

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA TEXTILNÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

LIBEREC 2014

MICHAELA MENCÁKOVÁ

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA TEXTILNÍ



Studijní program: B3107 Textil

Studijní obor: Management obchodu s oděvy

## VLIV ORIENTACE VRSTEV NA ÚČINNOST BALISTICKÉ OCHRANY

## INFLUENCE OF LAYER ORIENTATION ON THE EFFECTIVENESS OF BALLISTIC PROTECTION

Michaela Mencáková

**Vedoucí bakalářské práce:** Novák Ondřej, Ing. Ph.D.

**Konzultant práce:** Vosáhlo Josef, Ing.

**Rozsah práce:**

Počet stran textu.....58

Počet obrázků.....63

Počet grafů.....10

Počet tabulek.....19

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

Akademický rok: 2013/2014

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Michaela Mencáková  
Osobní číslo: T11000397  
Studijní program: B3107 Textil  
Studijní obor: Management obchodu s oděvy  
Název tématu: Vliv orientace vrstev na účinnost balistické ochrany  
Zadávací katedra: Katedra oděvnictví

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Proveďte literární rešerši vysokopevnostních vláken vhodných pro balistickou ochranou.
2. Stanovte vybrané mechanické vlastnosti potřebné pro popis účinnosti balistické ochrany.
3. Určete vliv orientace jednotlivých vrstev materiálu sendviče na účinnost balistické ochrany.
4. Získané výsledky diskutujte.



Rozsah grafických prací: dle rozsahu dokumentace

Rozsah pracovní zprávy: cca 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

- EHRESTEIN, Gottfried W.. Polymerní kompozitní materiály. 1. vydání. Praha: Scientia, 2009. 351 s.
- OSSWALD, Tim A., MENDES, Georg. Materials Science of Polymers for Engineers, Hanser Publishers. 2003. 622 s.
- ČSN 39 5360. Zkoušky odolnosti ochranných prostředků: zkoušky odolnosti proti střelám, střepinám a bodným zbraním: Technické požadavky a zkoušky. Praha: Český Normalizační Institut, 1995. 16 s.
- NIJ Standard-0101.06. Ballistic Resistance of Body Armor. Washington, DC: Director David Hagy, July 2008. 74 s.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ondřej Novák, Ph.D.

Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů

Konzultant bakalářské práce: Ing. Josef Vosáhlo

Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů

Datum zadání bakalářské práce: 2. listopadu 2013

Termín odevzdání bakalářské práce: 19. května 2014

Ing. Jana Drašarová, Ph.D.  
děkanka



doc. Ing. Antonín Havelka, CSc.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 2. listopadu 2013

## **PROHLÁŠENÍ**

Byla jsem seznámena s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

V Liberci dne 19. 5. 2014

.....

Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych ráda poděkovala panu Ing. Josefu Vosáhlovi a Ing. Ondřejovi Novákovi Ph.D. z Katedry netkaných textilií Technické univerzity v Liberci za konzultace, odborné vedení práce, cenné připomínky a rady.

## **ANOTACE**

Cílem práce je zjistit, zda má orientace materiálu v balistické ochraně vliv na její účinnost. Úvod práce je zaměřen na historii balistických vest a důvod jejich nošení. Rešeršní část práce je věnována materiálům, z kterých jsou neprůstřelné vesty vyrobeny. Experimentální část práce se zabývá stanovením tahové pevnosti balistické textilie a tvorbu simulačního modelu, který zohledňuje orientaci vrstev.

### **KLÍČOVÁ SLOVA:**

Kevlar, neprůstřelná vesta, pevnost v tahu, simulace.

## **ANNOTATION**

The aim of this thesis is to find out if the orientation of the material in the ballistic protection affects its efficiency. The introduction is focused on the history of bulletproof vests and the reason to wear them. The recherche part is devoted to the materials the bulletproof vests are made of. The experimental part of this thesis focuses on the examination of the tensile strength of ballistic material and the creation of a simulation model, which takes into account the orientation of the layers.

### **KEY WORDS:**

Kevlar, bulletproof vest, tensile strength, simulation.

## OBSAH

ÚVOD.....	8
1 LITERÁRNÍ REŠERŠE VYSOKOPEVNOSTNÍCH VLÁKEN VHODNÝCH PRO BALISTICKOU OCHRANU .....	9
1.1 ARAMIDOVÁ VLÁKNA .....	9
1.1.1 KEVLAR .....	12
1.1.2 TECHNORA.....	17
1.1.3 RECYKLACE ARAMIDOVÝCH VLÁKEN.....	18
1.2 POLYETYLENOVÁ VLÁKNA .....	19
1.2.1 DYNEEMA .....	23
1.2.2 SPECTRA.....	25
1.2.3 ZYLON.....	26
1.3 KONSTRUKCE BALISTICKÉHO MATERIÁLU A PRINCIP ZÁCHYTU	27
2 STANOVENÍ VLASTNOSTÍ POTŘEBNÝCH PRO POPIS ÚČINNOSTI BALISTICKÉ OCHRANY.....	30
2.1 PRŮMĚR VLÁKNA A JEMNOST.....	30
2.2 PEVNOST V TAHU .....	30
2.3 ELASTICITA.....	31
2.4 BALISTICKÁ ODOLNOST .....	31
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	32
3.1 STANOVENÍ PRŮMĚRU A PRŮŘEZU VLÁKNA A TEXTILIE .....	32
3.2 ZKOUŠKA PEVNOSTI V TAHU .....	33
3.3 VÝSLEDKY TAHOVÉ ZKOUŠKY V PODÉLNÉM SMĚRU .....	39
3.4 VÝSLEDKY TAHOVÉ ZKOUŠKY V PŘÍČNÉM SMĚRU .....	41
3.5 VÝSLEDKY TAHOVÉ ZKOUŠKY V DIAGONÁLNÍM SMĚRU (45°).....	43
3.6 VÝSLEDKY TAHOVÉ ZKOUŠKY V DIAGONÁLNÍM SMĚRU (135°)...	45
4 POČÍTAČOVÁ SIMULACE.....	47



4.1	STANOVENÍ HODNOT PRO MATERIÁLOVÝ MODEL.....	47
4.2	SIMULACE TAHOVÉ ZKOUŠKY .....	48
4.3	SIMULACE INTERAKCE STŘELY A TEXTILÍ .....	52
	ZÁVĚR .....	60
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	61
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	63
	SEZNAM GRAFŮ .....	64
	SEZNAM TABULEK .....	65

## **ÚVOD**

Balistická ochrana je prostředek osobní ochrany. Chrání člověka před účinky střelných zbraní tím, že klade pasivní odpor. Práce se zabývá především složením neprůstřelných vest. V současnosti se ochranné vesty dají rozdělit na dvě hlavní skupiny: lehké a těžké. Lehké ochranné vesty jsou tenké a používají se především v civilním sektoru pro skryté nošení. Tyto vesty jsou složeny z několika vrstev balistického materiálu. Při zasažení nositele dojde zpravidla k vnitřnímu zranění postřeleného. Těžké vesty slouží pro vojenské specialisty a zásahové jednotky, jsou určeny pro nošení na oděvu. Těžké vesty jsou opatřeny keramickou deskou nebo ocelovými pláty, které zabrání těžkému zranění nositele.

Historie ochranných prostředků je úzce spjata s vývojem zbraní. První vesta byla vyrobena z třiceti vrstev bavlněné tkaniny v 60. letech 19. století v Koreji. Další typ vest byl vyroben ze železného šrotu o 20 let později. Vesty byly postupně vyráběny z dalších kovových materiálů. Tyto vesty měly velkou nevýhodu ve své hmotnosti. V 2. polovině 20. století přišla na řadu skelná a nylonová vlákna. V polovině 70. let nastoupil kevlar, který se používá dodnes.

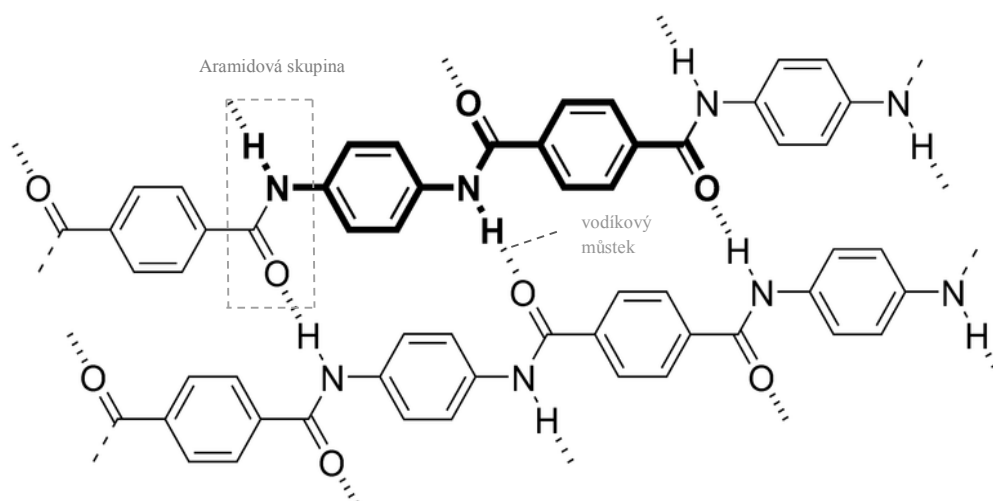
Rešeršní část práce se zabývá vlákny používanými jako balistický materiál, konstrukcí neprůstřelných vest a v neposlední řadě mechanickými vlastnostmi potřebnými pro splnění podmínek balistické ochrany. Experimentální část práce zkoumá tahovou pevnost materiálu v různých úhlech. Tahovou zkouškou byla prokázána pevnost kevlarového materiálu. Nejdůležitější částí experimentu je dynamická simulace, která napodobuje reálnou střelbu do balistického materiálu. Dynamická simulace je zastoupena ve čtyřech zkouškách, které se liší orientací jednotlivých vrstev materiálu.

# 1 LITERÁRNÍ REŠERŠE VYSOKOPEVNOSTNÍCH VLÁKEN VHODNÝCH PRO BALISTICKOU OCHRANU

Nejběžněji používanými materiály jsou vlákna aromatických polyamidů. Dalšími používanými vlákny jsou vlákna polyetylenová. Polyetylenová vlákna se liší chemickým složením a vlastnostmi. Také z nich vytvořená textilie má odlišnou strukturu.

## 1.1 ARAMIDOVÁ VLÁKNA

Aramidová vlákna jsou vlákna na bázi lineárních organických polymerů, jejichž kovalentní vazby jsou orientovány podle osy vlákna. Nejdůležitější vlastností těchto vláken je vysoká pevnost a tuhost. Aramidová vlákna jsou k dispozici ve dvou molekulárních skupinách, kterými jsou meta-aramidy a para-aramidy. Vlivem přítomnosti benzenových jader, které brání pohyblivosti polymerních segmentů, jsou řetězce aramidů tuhé, což silně omezuje jejich rozpustnost a také způsobuje jejich netavitelnost – dříve se rozkládají. [1, 6]

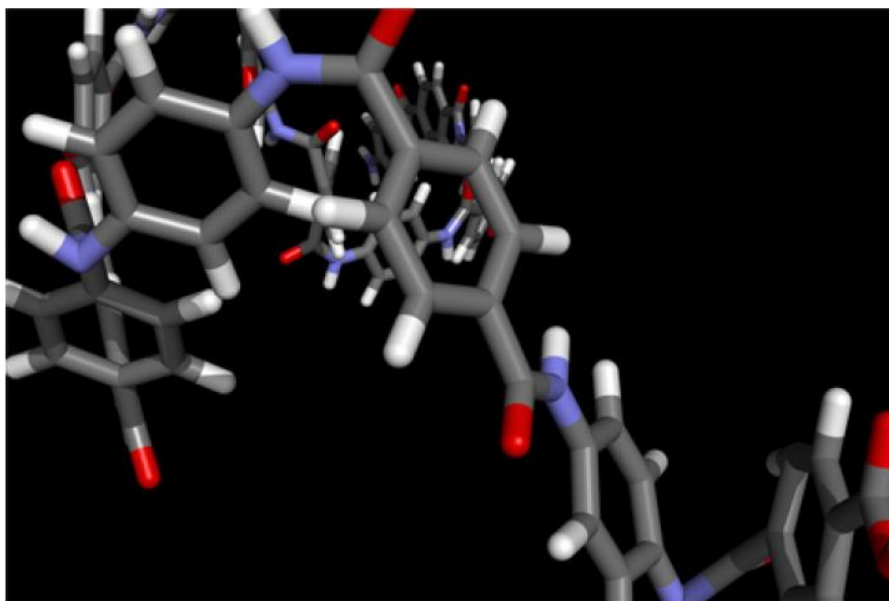


Obr. 1: Chemická struktura aromatického polyamidu [1]

Molekuly jsou navzájem spojeny vazbami vodíkových můstků. Pravidelné uspořádání fenolenových jader a amidových skupin s vazbami vodíkových můstků dodává řetězcům vysokou tuhost a současně vysokou hustotu struktury uspořádání. Protože kovalentní vazby ve směru molekul jsou daleko pevnější než vedlejší vazby mezi makromolekulami tvořené vodíkovými můstky, jsou příčné oscilace daleko větší a působí tahovými silami

*Vliv orientace vrstev na účinnost balistické ochrany*

na kotvící body a stahují vlákna v podélném směru dohromady. Pro zvýšení stupně osové orientovanosti řetězců molekul a tím i zvýšení hodnot mechanických vlastností procházejí vlákna procesem dloužení za zvýšené teploty. Aramidová vlákna se vyrábějí v různých druzích, které se liší navzájem hodnotami modulu pružnosti v tahu a tažností. Typy s nízkým modulem pružnosti a vyšším protažením jsou schopny pojmout podstatně vyšší deformační práci než vlákna s vyšším modulem pružnosti a nižší tažností. [1]



*Obr. 2: Molekulární struktura aramidového řetězce [23]*

Aramidová vlákna se řadí k vláknům s vynikajícími vlastnostmi, zejména vysokou pevností a značnou odolností vůči vysokým teplotám a chemikáliím. Používají se tam, kde je požadována vysoká tuhost, odolnost vůči nárazu a odolnost vůči abrazi. Aramidová vlákna se používají v plastových výztužích, pro lehké i těžké balistické aplikace jako jsou vesty a výbrojové desky. Vhodnost použití aramidu závisí na konstrukci tkaniny, rozhodujícím faktorem je její finální úprava. [9]

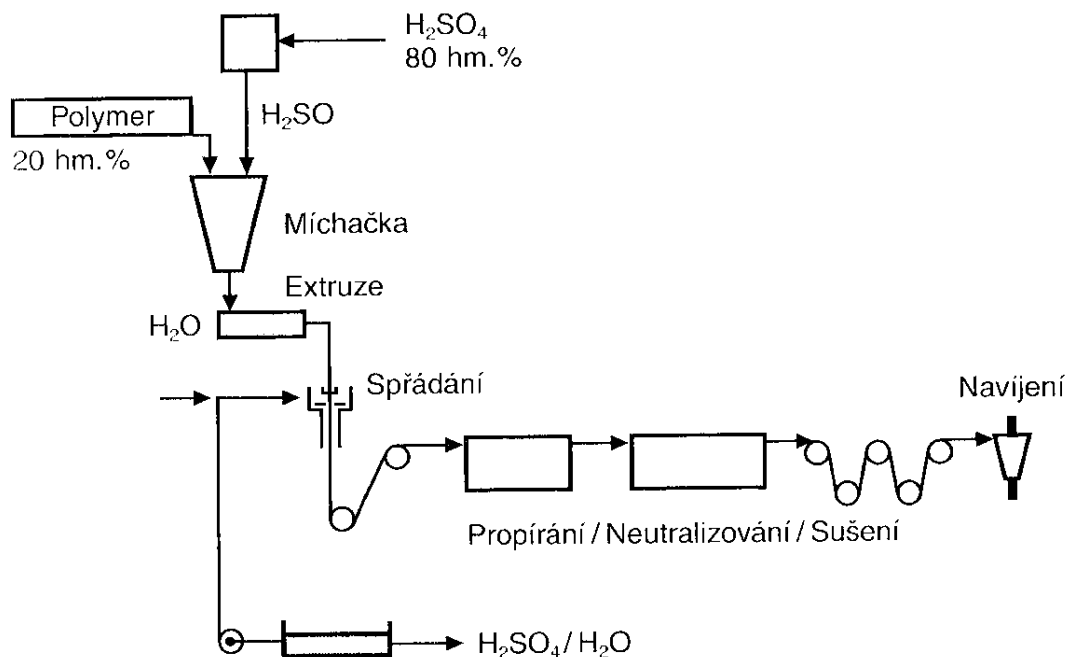
Meta-aramidová vlákna vynikají především svou termickou odolností a elektroizolačními schopnostmi. Para-aramidová vlákna jsou známá vyšší pevností v tahu a vyšším modulem pevnosti. [1, 5]

Tabulka 1: Porovnání vybraných vlastností aramidových vláken [5]

typ aramidových vláken		meta- struktura	para-struktura	
			standardní modul	vysoký modul
specifická hmotnost	g/m <sup>3</sup>	1,38	1,44	1,45
pevnost v tahu	MPa	610	2 800	2 800
modul pružnosti	MPa	17 000	59 000	127 000
protažení při přetrhu	%	15-30	4	2,2
teplota rozkladu	°C	370	550	550
tepelná vodivost	W/mK	-	0,04	0,04
výrobce/typ vlákna	DuPont	Nomex ®	Kevlar ® 29	Kevlar ® 49
	Teijin	-	Twaron ®	Twaron ® HM

## Výroba aramidových vláken

Vlákna jsou vyráběna z vysokoviskózního 20% roztoku v koncentrované kyselině sírové (obrázek 3). Jednotlivá elementární vlákna se poté spojují a pro zlepšení zpracovatelnosti se mnohokrát propírají, neutralizují a opatřují aviváží (pomocný textilní prostředek pro zlepšení kluzných a zpracovatelských vlastností). Aramidová vlákna se mohou zpracovávat se všemi běžnými reaktivními pryskyřicemi a termoplasty. V laminátu lze využít až 70% jejich skutečné pevnosti. [1]



Obr. 3: Výroba aramidových vláken [1]

### 1.1.1 KEVLAR

Kevlar je organické aramidové vlákno ze skupiny para-aromatických polyamidů. Roku 1965 byl vynalezen firmou DuPont. Tento vysokopevnostní materiál byl poprvé komerčně použit začátkem sedmdesátých let jako náhrada oceli v závodních pneumatikách. Kevlar má jedinečnou kombinaci vysoké pevnosti, pružnosti, tvrdosti a tepelnou stabilitu. V současné době se vyrábí mnoho druhů tohoto vlákna pro širokou škálu použití. [2]

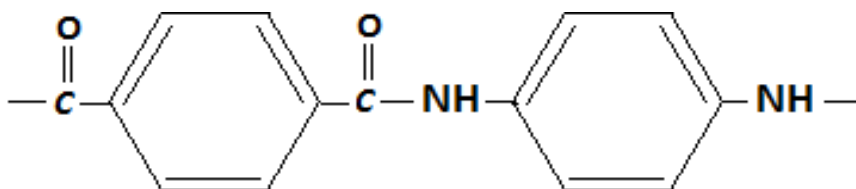


Obr. 4: Tkanina kevlaru [13]



Obr. 5: Kevlarová stříž [13]

První generace vláken vhodných pro ochranu proti mechanickému působení byl kevlar 29 zavedený v roce 1971. Kevlar 29 má malou odolnost v ohybu a vůči UV záření. Druhá generace kevlar 129 je lepší s ohledem na balistickou ochranu. Vlákná jsou vyráběna i ve formě stříže, drtě a vloček. [2, 6]



Obr. 6: Chemická struktura kevlaru [7]

## Vlastnosti vlákna

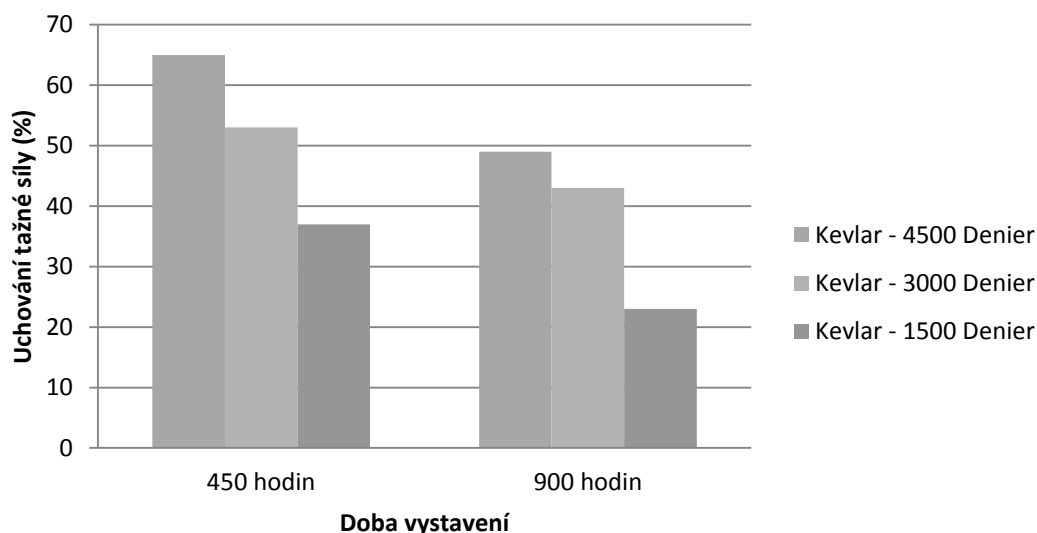
Kevlarové vlákno má polymerický řetězec paralelní struktury (viz obrázek 1). Tato struktura má za následek vysokou mechanickou pevnost a tepelnou odolnost vlákna. Díky velkému množství vodíkových můstků jsou řetězce aramidu soudržné, ale při namočení materiálu molekulami vody, které také obsahují vodíkové můstky, jsou vazby narušeny a výrobek ztrácí svoji typickou pevnost. Vlákna se vyznačují vysokou absorpcí vody. Další mechanické vlastnosti kevlaru jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 2: Mechanické hodnoty kevlaru [2]

Vlastnost	Jednotka	Kevlar 29	Kevlar 49
Jemnost	denier	1 500	1 140
Hustota	kg/m <sup>3</sup>	1440	1440
Pevnost v tahu	GPa	3,6	3,6
Modul pružnosti v tahu	GPa	70,5	112,4
Prodloužení do přetrhu	%	3,6	2,4

Kevlar je chemicky stabilní, pouze dlouhodobé působení silných kyselin a zásad může způsobit degradaci vlákna. Díky této vlastnosti je vlákno velice obtížně barvitelné, musí se tedy barvit v podobě roztoku již v průběhu výroby.

Jako všechna polymerní vlákna je i kevlar citlivý na ultrafialové záření (dále jen UV záření). Nechráněné vlákno má po dlouhodobém působení UV záření tendenci měnit barvu z typické žluté na hnědou. K degradaci vlákna dojde, pokud je polymer schopný záření pohltit a síla UV záření je dostatečně silná k porušení chemických vazeb. Dlouhodobé působení UV záření může způsobit snížení mechanických vlastností. Záleží na již zmíněné vlnové délce, době vystavení vlákna záření a intenzitě záření. Odolnost UV záření roste s šířkou (jemností) vlákna. Pokud je tedy nutné materiál vystavit dlouhodobému působení UV záření, musí se tkanina nebo samotná vlákna zakrýt jiným materiálem, který UV záření nepropouští.



*Graf 1: Stabilita kevlarového vlákna při vystavení UV záření [2]*

Vlákno je nevodivé a nehořlavé, může být zapáleno, ale po odebrání zdroje plamene přestává hořet. Při spalování se netaví. Díky této vlastnosti vlákna se zabrání šíření plamene. Při spalování vlákna se uvolňují látky podobné jako při spalování vlny – oxid uhličitý a voda. V závislosti na podmínkách hoření může být produkován oxid uhelnatý, malé množství kyanovodíku a další toxické plyny.

Kevlar vyniká svou vysokou pevností v tahu, nízkou hmotností a malým prodloužením. Vlákno se netaví, na vzduchu se rozkládá za relativně vysokých teplot – od 427°C do 482 °C. Teplota rozkladu se mění s rychlostí teplotního růstu a délky působení. Se zvýšením teploty nastává váhový úbytek vlákna způsobený především ztrátou vody. Ani nízké teploty nemají podstatný vliv na vlastnosti vlákna, degradace nebyla prokázána ani při - 196°C. Při vystavení vlákna horkému vzduchu nebo horké vodě se vlákno nesmrští, na rozdíl od jiných organických vláken, které se smrští nevratně. [2]



## TWARON

Vlákno twaron patří do skupiny para-aramidů. Vlákno má zhruba stejnou chemickou strukturu jako kevlar. Začátkem osmdesátých let začala s jeho výrobou firma Teijin. Vyznačuje se jedinečnou kombinací mechanických vlastností, chemickou odolností, vynikající trvanlivostí a tepelnou stabilitou. Díky mnoha možnostem použití je používán ve více průmyslových odvětvích. Aby vlákno vyhovovalo různým aplikacím, vyrábí se v různých formách: nekonečné vlákno, stříž, ve formě prášku, tkaniny a laminátu. [7]

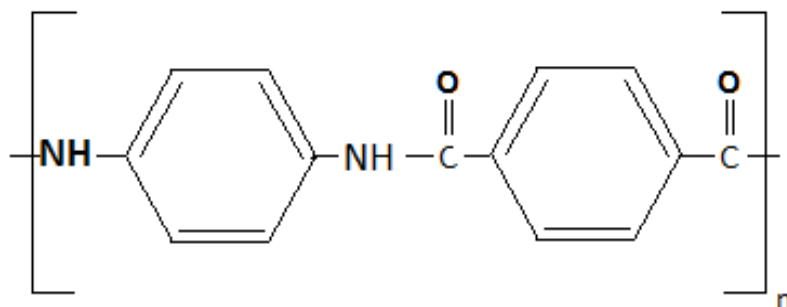


Obr. 7: Formy vlákna twaron [14]



Obr. 8: Neprůstřelná vesta (spodní vrstva) [14]

Twaronová vlákna se skládají z dlouhých molekulových řetězců. Množství meziřetězcových vazeb tvoří materiál extrémně pevným. Svou pevnost vlákno také částečně získává z vodíkových vazeb mezi karbonylovými skupinami.



Obr. 9: Chemická struktura twaronu [26]

## Vlastnosti vlákna

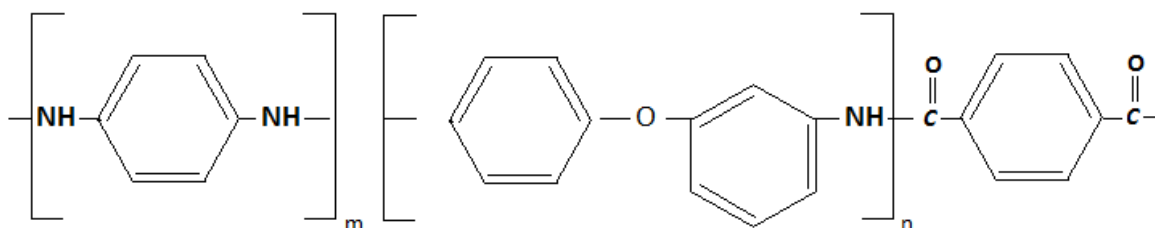
Twaron je, jako všechna aramidová vlákna, citlivý na působení UV záření. Vláknem má vysokou pevnost v tahu – je pětikrát pevnější než ocel. Je odolné odření a organickým rozpouštědly. Twaron má velmi dobrou odolnost proti vysokým teplotám, zachovává si svou pevnost a pružnost i vůči kryogenickým teplotám (-196°C) – dokonce je při nízkých teplotách i o něco pevnější. Při vysokých teplotách je pevnost v tahu snížena o 10-20%. Vláknem je nevodivé a nemá teplotu tání – rozklad začíná při teplotě 500°C. Nekoroduje, je tedy vhodné i na použití ve vlhkém prostředí nebo pod vodou. V tabulce 3 jsou uvedeny mechanické vlastnosti twaronu. [7, 8]

Tabulka 3: Mechanické hodnoty twaronu [7]

Vlastnost	Jednotka	Druh twaronu		
		Standard	Vysoký modul	Vysokopevnostní
Jemnost	dtex	420 – 3 360	420 – 24 150	420 – 3 360
Hustota	kg/m <sup>3</sup>	1440	1440	1440
Pevnost v tahu	GPa	3,6	2,4 – 3,6	2,4 – 3,6
Modul pružnosti v tahu	GPa	60 - 80	100 - 120	85 - 95
Prodloužení do přetrhu	%	3,0 – 4,4	2,2 - 3,0	3,3 – 4,0

### 1.1.2 TECHNORA

Technora je para-amidové vlákno vyrobené z kopolymeru. Komerční výrobu začala roku 1987 firma Teijin. Vlákno je oproti twaronu flexibilnější při zachování vysoké pevnosti.



Obr. 10: Chemická struktura technory [11]

Vlákno je charakteristické svou přírodní zlatou barvou, je možné ho obarvit na tmavě šedou i černou barvu. Barva nemá žádný vliv na vlastnosti vlákna. Příze se vyrábí o jemnostech 220 až 2 500dtex. Staplová vlákna se vyrábí o jemnosti 1,7dtex. [11]



Obr. 11: Vlákno technora [11]

### Vlastnosti vlákna

Vlákno se vyznačuje především vysokou pevností – je osmkrát pevnější než ocel a třikrát pevnější než skleněné vlákno. Odolává chemikáliím, především kyselinám a zásadám, slané vodě, korozi a teple. Vlákno je dlouhodobě rozměrově stabilní a odolné proti únavě. Své vlastnosti si zachovává i při opakovanému oděru, ohýbání a natahování. Tepelný rozklad vlákna nastává při 500°C. [15]

Tabulka 4: Mechanické hodnoty technory [26]

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
Hustota	kg/m <sup>3</sup>	1390
Pevnost v tahu	GPa	3,4
Modul pružnosti v tahu	GPa	74
Prodloužení do přetrhu	%	4,5

*Vliv orientace vrstev na účinnost balistické ochrany*

### 1.1.3 RECYKLACE ARAMIDOVÝCH VLÁKEN

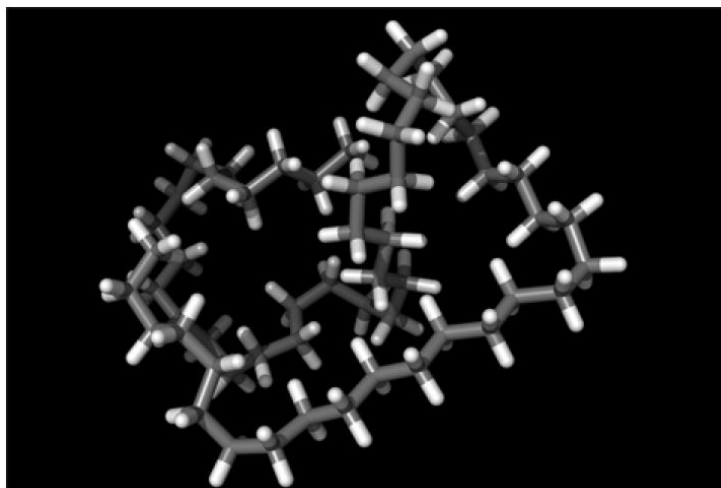
Japonská firma Teijin organizuje sběr použitých textilií s obsahem para- a meta-aramidových vláken. Od roku 2008 je recykluje a vyrábí z nich vlákno Twaron Pulp 0701. Firma neustále pracuje na vývoji nových recyklačních procesů pro zpracování aramidového odpadu. V současnosti je schopná recyklovat zpracované, nezpracované, čisté i kontaminované výrobky obsahující aramidová vlákna. Vykupuje především aramidové balistické vesty, ochranné rukavice, zbytky aramidových přízí, části optických kabelů. Vykoupené vzorky jsou testovány a zpracovány dle své kvality. Recyklovaná vlákna jsou použita v nebalistických výrobcích. Díky globálnímu dosahu je firma schopna odkoupit aramidový odpad z celého světa. Používání recyklovaných vláken vede k snížení emisí, nižší toxicitě a ke snížení odpadních vod. V červnu 2012 firma za svůj recyklační program získala ocenění Responsible Care od Dutch Chemical Industry (VNCI). Tato cena je každoročně udělována chemickým podnikům, které mají vynikající výsledky v oblasti bezpečnosti, ochrany zdraví, životního prostředí a udržitelnosti. [3, 4]



Graf 2: Množství recyklovaného materiálu v tunách za rok [3]

## 1.2 POLYETYLÉNOVÁ VLÁKNA

Na rozdíl od aramidových vláken se polyetylenová vlákna vyznačují velice nízkou hmotností, vysokou pevností v tahu a odolností vůči UV záření. Největší zastoupení mají v námořnickém průmyslu, kde se využívají pro výrobu kotvících lan. Další významné využití těchto vláken je při výrobě neprůstřelných vest, kde nositelé upřednostňují lehkost materiálu.



Obr. 12: Molekulární struktura polyetylenového řetězce [2]

Pro své výhodné vlastnosti, především chemické a fyziologické, se tento materiál velmi brzy zařadil mezi nejdůležitější termoplasty. Dnes je používán téměř ve všech průmyslových odvětvích.

### Výroba polyetylénu

Pro přípravu polyetylénu je nutné nejdříve vyrobit monomer. Podle použitého tlaku rozeznáváme vysokotlakou, středotlakou a nízkotlakou polymeraci.

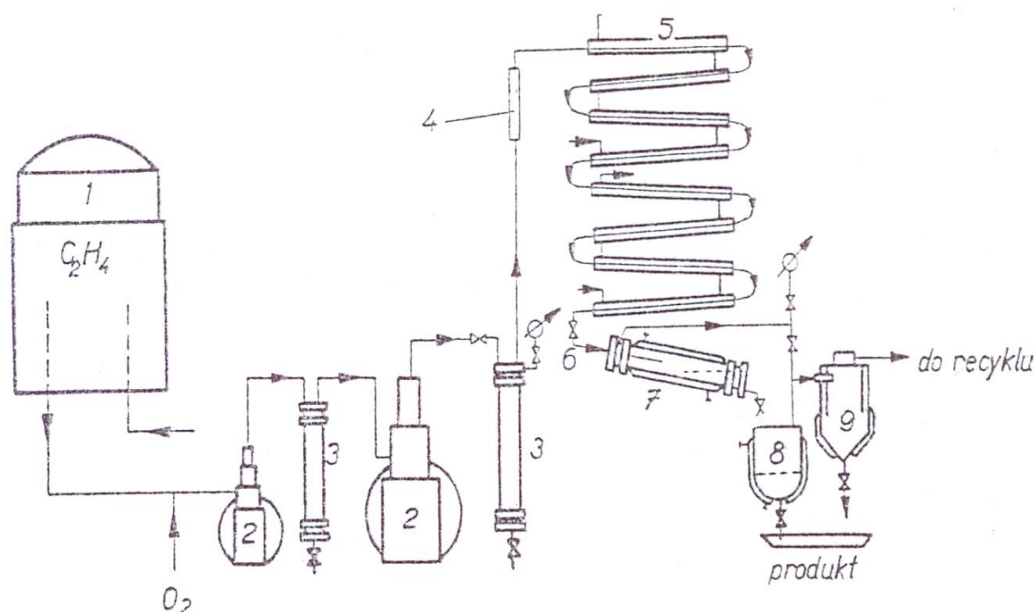
### Výroba monomeru

Základní surovinou pro výrobu je etylén -  $C_2H_4$ . Etylén vzniká jako vedlejší produkt při zpracování ropy nebo jako jeden z hlavních produktů při jejím krakování nebo pyrolýze. Krakování i pyrolýza jsou založeny na tepelném štěpení ropných parafinických uhlovodíků. Rozdíl je tedy pouze v teplotách. Krakování je proces, který probíhá při teplotách od 350°C do 650°C, pyrolýza probíhá při teplotách nad 650°C. Pro správný výsledek polymerace je nutné získaný etylén ještě chemicky dočistit.

*Vliv orientace vrstev na účinnost balistické ochrany*

## Vysokotlaká polymerace etylénu

Poprvé se povedlo připravit vysokomolekulární polymer roku 1935 za použití velmi vysokého tlaku. Postup vysvětluje Tomis ([24], s. 19): *Základem této přípravy je polymerace etylénu v plynné fázi za tlaku 1 000 až 2 000 at (100 až 200 MPa) a za přítomnosti malého množství kyslíku jako iniciátoru, při teplotě 150-250°C. Časem byl postup různě modifikován, zejména pokud jde o teplotu iniciátoru a způsob polymerace, takže dnes můžeme rozlišovat čtyři typy vysokotlakého procesu: 1. polymeraci v plynné fázi, 2. polymeraci v suspenzi, 3. polymeraci v emulzi, 4. polymeraci v roztoku. Všechny tyto způsoby se vyznačují tím, že se polymerace provádí za vysokého tlaku, za zvýšené teploty a za spolupůsobení iniciátorů produkujících volné radikály. Produkt získaný vysokotlakou polymerací má průměrnou molekulovou hmotnost 15 000 - 40 000 a bod tání 105 - 120°C. S rostoucím tlakem prudce vzrůstá rychlost reakce, molekulová váha i výtěžek polymeru. Jako iniciátor se používá kyslík, jehož množství má vliv na molekulovou váhu polymeru i rychlost polymerace. Poměr mezi teplotou, tlakem a obsahem kyslíku ovlivňuje jakost výsledného polymeru i rychlost polymerace. Pokud nejsou tyto tři faktory v souladu, reakce nenastane nebo dojde k exploznímu rozkladu za vzniku uhlíku, metanu a vodíku. Na základě patentové literatury je na obrázku 13 uvedeno schéma zařízení. [24]*



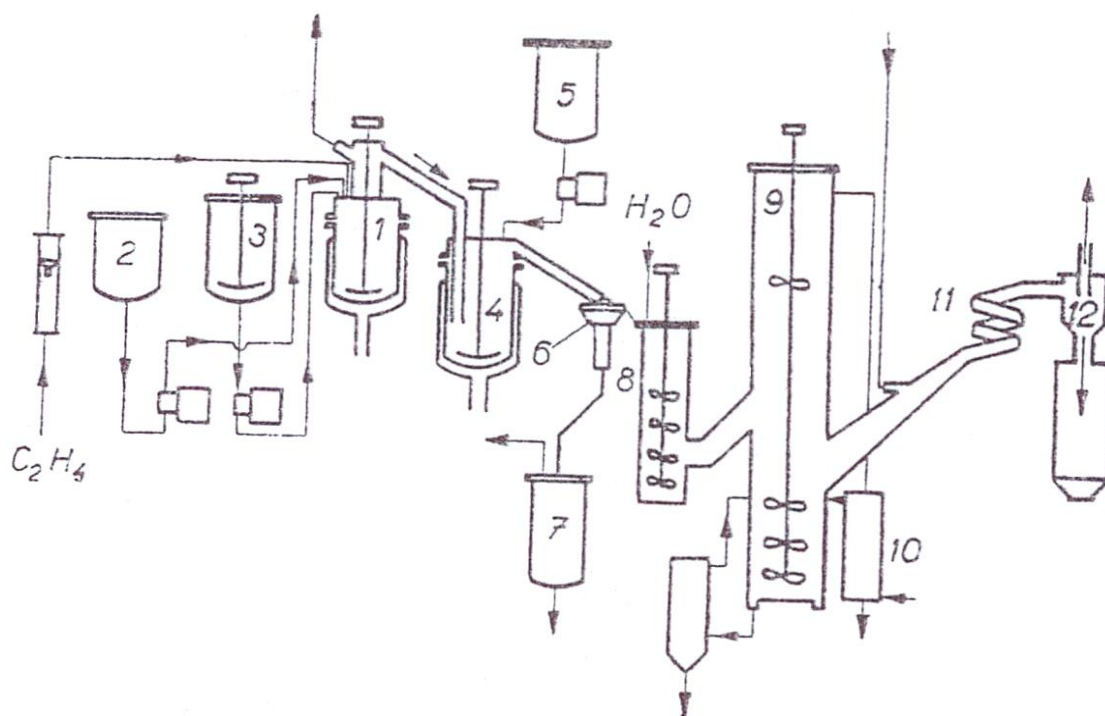
Obr. 13: Schéma vysokotlaké polymerace etylénu [24]

- 1 - plynojem, 2 - kompresor, 3 – filtr, 4 – explozní pojistka, 5 – reaktor, 6 – odpouštěcí ventil,  
7, 8 – odlučovač, 9 - cyklón

## Nízkotlaká polymerace etylénu

V roce 1953 objevil Ziegler beztlakovou polymeraci. Do té doby byl uznáván pouze názor, že polymeraci lze provést pouze za vysokého tlaku. Postup vysvětluje Tomis ([24], s. 26): *Beztlaková polymerace etylénu za použití katalyzátorů připravených z alkylderivátů hliníku a chloridu titaničitého je nesporně jedním z nejvýznamnějších úspěchů moderní chemie polymerů.*

Polymerace za nízkého tlaku se používá zřídka, protože se pracuje s látkami citlivými na kyslík obsažený ve vzduchu i na vzdušnou vlhkost. Alkylderiváty hliníku lze uchovávat pouze v ochranné atmosféře inertního plynu, práce s nimi je tedy více než náročná. Technologii nízkotlaké polymerace popisuje Tomis ([24], s. 36): *Velká aktivita Zieglerových katalyzátorů a mírné polymerační podmínky dovolují řešit technologii výroby polyetylénu nejen šaržovým, ale především kontinuálním způsobem. Jednotlivé způsoby se od sebe liší jen v podrobnostech, princip zůstává většinou stejný. Jedno z běžných schémat polymerace je znázorněno na obrázku 14. [24]*



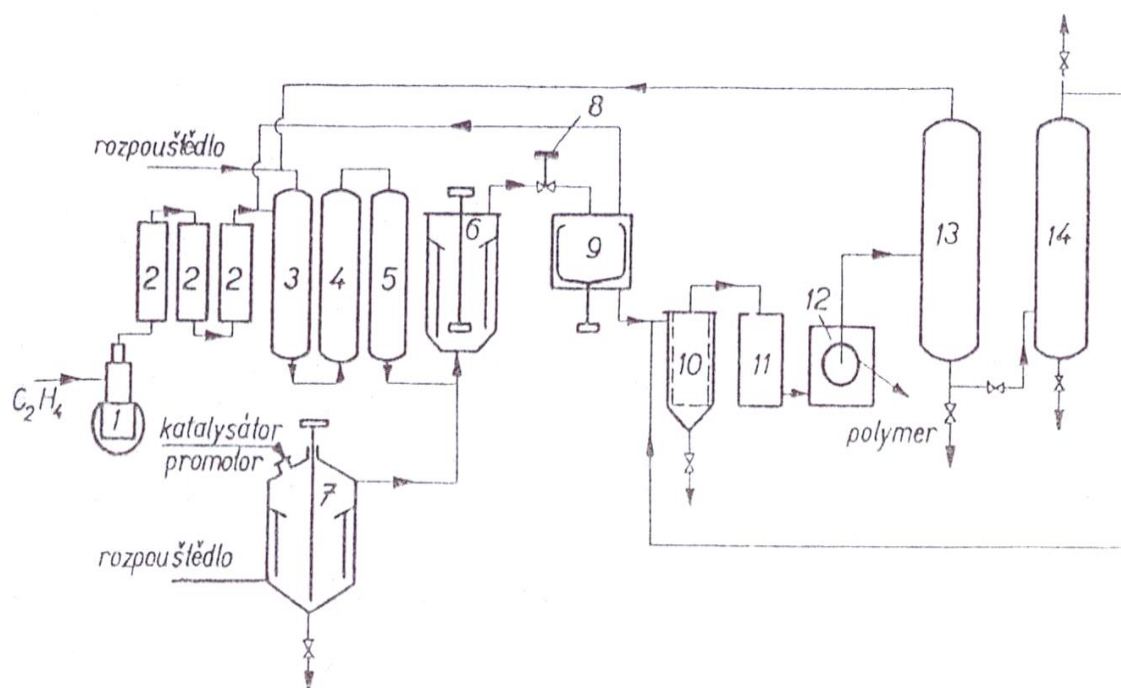
Obr. 14: Schéma nízkotlaké polymerace etylénu [24]

- 1 – polymerační reaktor, 2 – zásobník na rozpouštědlo, 3 – zásobník na katalyzátor,  
4 – směšovací reaktor, 5 – zásobník na metanol, 6 – filtr, 7 – zásobník na filtrát,  
8 – studená prací věž, 9 – horká prací věž, 10 – chladič, 11 – sušící had, 12 – cyklón



## Středotlaká polymerace etylénu

Středotlaká polymerace je velice podobná nízkotlaké polymeraci. Byla patentována americkými firmami Phillips Petroleum Co. a Standard Oil Co. téměř současně s Zieglerovým objevem. Proces probíhá za velmi mírných podmínek: tlaku do 6,8 MPa a teploty do 300°C, v prostředí uhlovodíkového rozpouštědla a za použití nových katalyzátorů. Teplota procesu závisí na typu katalyzátoru, volbou koncentrace monomeru lze ovlivnit rychlost polymerace i molekulovou váhu polymeru, ta klesá se stoupající teplotou. Nové katalyzátory popisuje Tomis ([24], s. 41): *Hlavními představiteli jsou kysličník chromový na silikaalumině jako nosiči (katalyzátor firmy Phillips) a kysličník molybdenový na kysličníku hlinitém (katalyzátor firmy Standard). Proti Zieglerovým katalyzátorům mají tyto kysličníky výhodu především ve snadném způsobu přípravy a v regenerovatelnosti.* Technologické schéma postupu je znázorněno na obrázku 15. [24]



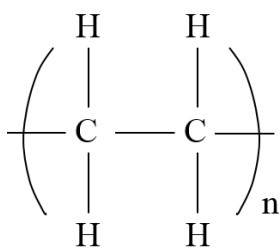
Obr. 15: Středotlaká polymerace etylénu [24]

- 1 – kompresor, 2 – čistič, 3 – absorber, 4 – čisticí věž, 5 – výměník, 6 – reaktor, 7 – reaktor pro přípravu katalyzátoru, 8 – redukční ventil, 9 – odstředivka, 10 – filtr, 11 – chladič, 12 – filtr, 13, 14 – rektifikační kolony



### 1.2.1 DYNEEMA

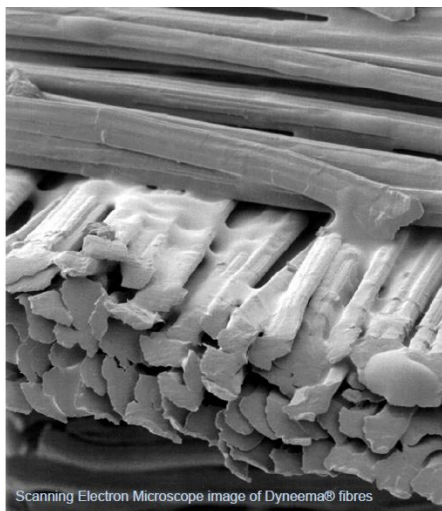
Dyneema je polyetylenové vlákno s vysokou pevností. Bylo objeveno v roce 1979 a od roku 1990 ho vyrábí firma DSM v Holandsku a v USA. Vlákno je také známé jako UHMWPE (Ultra High Molecular Weight Polyethylene Fiber), tedy vlákno s ultra vysokou molekulární hmotností. UHMWPE je druh polyolefinu. Ten se skládá z velmi dlouhých řetězců polyetylenu, které jsou stejnosměrně uspořádány. Je to nejpevnější vlákno, je desetkrát pevnější než ocel. Vlákno je vyráběno procesem gelového zvlákňování. Vyniká vysokým specifickým modulem, malým prodloužením do přetrhu, vysokou odolností proti abrazi, UV záření a chemikáliím. Během několika let se vlákno začalo používat v mnoha tržních segmentech jako ochrana zdraví, námořnictví a letectví. Pro aplikaci do neprůstřelných vest se vlákna spojí do vrstev, které jsou skládány v různých úhlech za vzniku kompozitu s různými pevnostmi ve všech směrech. [16, 17, 18]



Obr. 16: Chemická struktura dyneemy [18]



Obr. 17: Dyneemová vlákna [23]



Obr. 18: Vlákno dyneemy pod elektronovým mikroskopem [23]

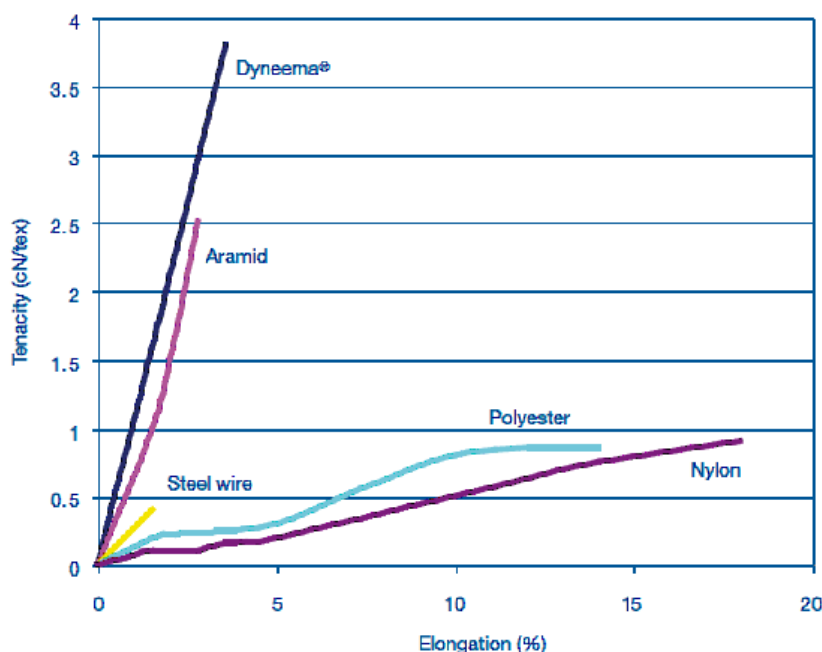
*Vliv orientace vrstev na účinnost balistické ochrany*

## Vlastnosti vlákna

Největší předností vlákna je jeho nízká hmotnost. Vláknem plave a je odolné proti slané vodě, UV záření i chemikáliím. Nízká třecí schopnost zaručuje dlouhou životnost materiálu. V porovnání s jinými syntetickými vlákny je vlákno výborně odolné proti otěru. Tažnost do přetrhu vlákna je menší než 2,5%. Vláknem je termoplastické (plast, který je do určité teploty tvárný se po ochlazení stane pevným). Teplota tání vlákna je od 144°C do 152°C. Při krátkém vystavení vlákna vysokým teplotám, neztratí své vlastnosti. Své vlastnosti si vlákno uchovává i při -150°C. S rostoucí teplotou a zároveň s rostoucím zatížením vlákna dochází k nevratnému prodloužení vlákna - tento jev se nazývá tečení. Dyneema je v současné době termoplastický materiál s největší odolností proti nárazu. Má extrémně nízkou absorpci vlhkosti. [16, 18]

Tabulka 5: Mechanické hodnoty dyneemy [27]

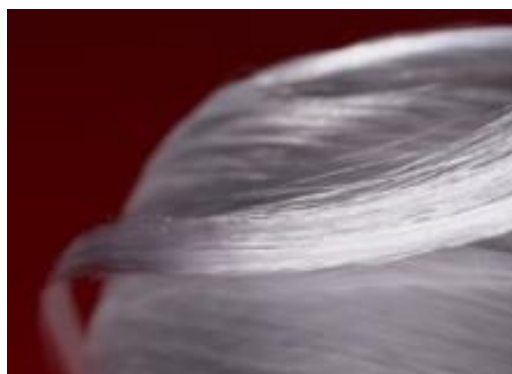
Vlastnost	Jednotka	Hodnoty
Hustota	kg/m <sup>3</sup>	960 - 990
Pevnost v tahu	GPa	1,4 – 3,09
Modul pružnosti v tahu	GPa	55,0 – 172,0
Prodloužení do přetrhu	%	3,5



Graf 3: Porovnání vláken: síla / prodloužení [17]

### 1.2.2 SPECTRA

Spectra je polyetylénové vlákno s vysokou pevností a velice nízkou hmotností, bylo objeveno v roce 1985 firmou Honeywell v USA. Je to vlákno s ultra vysokou molekulární hmotností, je patnáctkrát pevnější než ocel a přitom plave na vodě. Vlákno je charakteristické svou zářivě bílou barvou. Z těchto vláken se vyrábí netkaný výrobek, zvaný Spectra Shield®. Výrobek je tvořen rovnoběžně orientovanými vlákny spectra zalitými v pružné pryskyřici. Vždy dvě vrstvy s navzájem kolmo orientovanými vlákny jsou zality do slabé polyetylénové folie. Spectra Shield® je vytvořen z více vrstev těchto polyetylénových folií. Spectra Shield® je výrazně odolnější proti opakovaným zásahům, vysokorychlostním střelám a proti šikmým zásahům. Dalším podobným materiálem z vláken spectra, používaným pro balistické účely, je Gold Shield® a Gold Flex®. [10, 12, 19]



Obr. 19: Vlákno spectra [28]

#### Vlastnosti vlákna

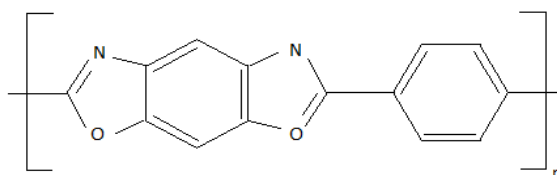
Vlákno je známé svou visko-elasticitou a specifickou tuhostí, která je o 40% vyšší než tuhost aramidových vláken. Spectra dokáže odolat vysokému deformačnímu zatížení. Vlákno je odolné chemikáliím, vodě i UV záření. Další vynikající vlastností vlákna je jeho nízká tažnost a odolnost oděru. [19]

Tabulka 6: Mechanické hodnoty spectry [28]

Vlastnost	Jednotka	Spectra 1000
Hustota	kg/m <sup>3</sup>	970
Pevnost v tahu	GPa	3
Modul pružnosti v tahu	GPa	103
Prodloužení do přetrhu	%	3,1

### 1.2.3 ZYLON

Zylon je polyetylénové vlákno, které od roku 1980 vyrábí japonská firmou Toyobo Corporation. Vlákno je také známé pod značkou PBO. Na rozdíl od ostatních polyetylénových vláken není zylon tak lehký a po dlouhodobém vystavení UV záření a viditelnému světlu vykazuje pokles pevnosti. Je tedy nutné toto vlákno chránit před UV zářením (jako kevlar). Zylon je dostupný v mnoha formách: nekonečné vlákno, příze, stříž, tkanina i pletenina. [21, 22]



Obr. 20: Chemická struktura zylonu [20]

#### Vlastnosti vlákna

Vlákno se vyznačuje velkou pevností v tahu a modulem, naměřené hodnoty převyšují téměř dvojnásobně hodnoty para-amidových vláken. Je odolné proti řezu i oděru. Ve vlhkých podmínkách klesá pevnost vlákna. Na rozdíl od ostatních polyetylénových vláken neodolává zylon působení mořské vody. Je tepelně stabilní a odolné běžným chemikáliím (působením silných kyselin, klesá pevnost). Teplota rozkladu vlákna je 650°C. Zylon je nehořlavý, hoří pouze v prostředí s 68 procenty kyslíku. Vlákno je odolné vůči tečení. Působením horkého vzduchu na vlákno dochází k minimálnímu smrštění. [21, 22]



Obr. 21: Zylon [22]



Obr. 22: Zylonové vlákno [25]

Tabulka 7: Mechanické hodnoty zylonu [25]

Vlastnost	Jednotka	Zylon HM
Hustota	kg/m <sup>3</sup>	1560
Pevnost v tahu	GPa	5,8
Modul pružnosti v tahu	GPa	280
Prodloužení do přetrhu	%	2,5

*Vliv orientace vrstev na účinnost balistické ochrany*

### 1.3 KONSTRUKCE BALISTICKÉHO MATERIÁLU A PRINCIP ZÁCHYTU

V současnosti jsou balistické vesty vyrobeny ze syntetických vláken vysoké pevnosti. Jednotlivá vlákna jsou opatřena zákrutem do formy příže a ta je pak dále zpracována do formy tkaniny nebo kompozitu. Balistická ochrana je složena z několika vrstev materiálu. Od počtu vrstev se odvíjí výsledný efekt ochrany, ale i cena vesty.

Základem neprůstřelné vesty je v první řadě balistický nosič, který slouží k úschově balistického materiálu a jeho ochraně před UV zářením. Další vrstvy tvoří samotný balistický materiál a antišoková vložka. Ochranný plát na obrázku 24 je součástí pouze těžkých vojenských vest.

Nosiče bez ochranných plátů jsou označovány jako lehké a jsou primárně určeny pro nošení pod oděvem. Tento typ vesty musí být konstruován tak, aby se dokázal přizpůsobit tvaru těla nositele, protože jasné obrysy vesty by byly pod oblečením zřejmé a ve většině situací nežádoucí. Vyskytují se především v civilním sektoru. Dalším druhem neprůstřelných vest jsou nosiče vojenské, označované jako těžké. Těžké vesty mají navíc další ochranné prvky, vyrobené z dalších balistických materiálů, jako jsou například ocelové pláty nebo keramické destičky. Tyto vesty poskytují zvýšenou balistickou ochranu a jsou určeny pro nošení na oděvu. Nevyžadují speciální konstrukci, takže jsou stejné pro muže i ženy. [23]



Tkanina pro lehkou balistickou ochranu

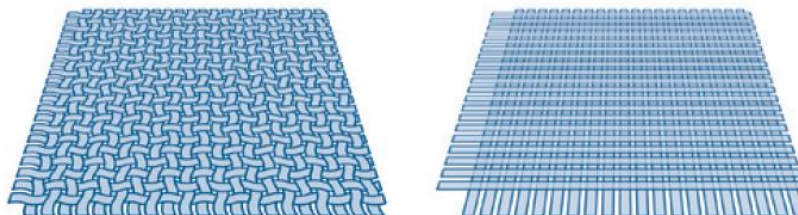


Ochranný plát pro těžkou balistickou ochranu

*Obr. 23: Materiál pro balistickou ochranu [23]*

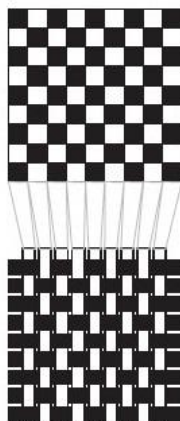
U balistických vest se jako materiál používají aramidová nebo polyetylenová vlákna. Struktura materiálu je zřetelná na obrázku 23. Aramidová vlákna jsou ve formě tkaniny, polyetylenová vlákna jsou ve formě laminátu. Laminát vzniká položením dvou na sebe vzájemně kolmých vrstev vláken, které jsou poté zafixovány pružnou pryskyřicí. Toto složení lépe umožňuje vstřebat energii balistického nárazu, čímž nabízí lepší ochranu. Laminátové vesty bývají tvrdší než vesty složené z tkaniny.

Tkanina balistického materiálu se rozřezává do určitých tvarů dle šablon. Takto nařezané díly jsou stohovány do přesně daných hromádek. Aramidový materiál je nutné sešít nebo spojit lepením. Sešití je možné dvěma způsoby: po obvodu nebo do kříže. Obšití je nenáročné a relativně rychlé, výsledný panel umožňuje pružnost vesty. Šitím do kříže se vytváří kosočtvercový vzor. Tento způsob je náročnější a pomalejší, ale výsledný panel je pevnější. Polyetylenový materiál není nutné sešívát, pouze se těsně vkládá do připravených kapes na nosiči balistického materiálu.



Obr. 24: Konstrukce materiálu - tkanina a laminát [23]

Tkaniny z aramidových vláken se nejčastěji vyrábějí v plátnové vazbě. Plátno je nejjednodušší vazba, rub i líc jsou stejně vzorované. Jedná se o tzv. oboustrannou vazbu. Dochází k nejhustšímu provázání tkaniny.



Obr. 25: Vazba plátno [25]

Antišoková vložka je důležitý prvek ve složení balistické ochrany. Při zásahu vesty projektilem o vysoké rychlosti dochází k přenosu velkého množství kinetické energie na nositele vesty. K tomuto jevu dochází i při úplném zastavení projektilu balistickým materiálem. Kinetická energie je následně přeměněna na mechanickou práci, která se projevuje deformací místa zásahu. Jelikož je lidské tělo složeno převážně z vody, která je z fyzikálního hlediska nestlačitelná, může se tlaková vlna šířit organismem vysokou rychlostí. V tomto případě dochází k vnitřnímu zranění nositele, i když projektil byl zastaven balistickým materiálem. Antišoková vložka tomuto jevu předchází, protože dokáže rozložit kinetickou energii na větší plochu, nedochází tedy k tak drastickému zranění. Antišokové vložky jsou v nosiči umístěny co nejblíže k tělu nositele. Pro výrobu jsou použity fólie z netříštivého polykarbonátu nebo z nebalistického materiálu, který redukuje průhyb. Tímto materiálem je polyuretan. [23]

Při průniku projektilu do vesty dochází k tzv. traumatickému efektu. Traumatický efekt je jev, při němž dochází k průhybu vesty po zastavení vystřeleného projektilu. Tento jev má značný vliv na organismus člověka. Jakmile se projektil zastaví ve vrstvách materiálu, jeho kinetická energie pokračuje dál. Dochází tedy k průhybu, což v praxi znamená povedený boxerský úder, který zasažený citelně pocítí. Normy pro průhyb jsou různé. Americká norma NIJ standart 0101.06 povoluje průhyb materiálu do hloubky čtyř centimetrů, ČR se řídí normou ČSN 39 5360, která povoluje průhyb do hloubky tří centimetrů. Statistiky neuvádějí, že by vlivem traumatického efektu některý zasažený utrpěl smrtelné zranění.

Pokud projektil přece jen do těla postřeleného vnikne, deformuje se, zvětší svůj průměr, v těle vznikne velmi široký střelný kanál a vytvoří se tzv. přechodová dutina. Tlakem, který před sebou tlačí měkkou tkáň, tvořenou převážně vodou, dochází k velkému rozestoupení vnitřních orgánů a jejich následnému stažení. Zpravidla dochází ke zranění vnitřních orgánů a žeber. Tento jev je tedy velice nebezpečný pro lidský organismus. [12]



## **2 STANOVENÍ VLASTNOSTÍ POTŘEBNÝCH PRO POPIS ÚČINNOSTI BALISTICKÉ OCHRANY**

Mechanické a geometrické vlastnosti svědčí o kvalitě vláken, což je důležité zejména pro technické účely. Mechanické charakteristiky jsou závislé na chemickém složení vláken (typu a intenzitě mezimolekulových vazeb), molekulové hmotnosti polymerních řetězců a podmínkách zvlákňování. [6]

### **2.1 PRŮMĚR VLÁKNA A JEMNOST**

Jemnost je důležitou geometrickou vlastností vláken. Ovlivňuje ohybovou tuhost a splývavost materiálu. Jemnost se v textilním průmyslu standardně používá pro vyjádření tloušťky vláken. Jemnost  $T$  je definována jako hmotnost vlákna  $m$  [g] na jednotku jeho délky  $l$  [km]. Základní jednotkou je [tex]. Vlákná o stejné jemnosti mohou mít tedy jiné průměry. Vláknó s menší měrnou hmotností bude mít větší průměr než vláknó s větší měrnou hmotností. Chemická vlákna se podle jemnosti dají rozdělit do tří skupin: jemná (1 dtex), extrajemná (0,5 dtex), superjemná (0,1 dtex). Pro stanovení jemnosti se nejčastěji používá vážení přesně naměřené délky vlákna a zjišťování jemnosti vláken pomocí optické metody. Mezi novější způsoby stanovení jemnosti patří např. zjišťování jemnosti vláken ve vzdušném proudu a vibrací. [29, 30]

### **2.2 PEVNOST V TAHU**

Pevnost v tahu patří mezi nejzákladnější mechanické vlastnosti. Charakterizuje odolnost vlákna vůči mechanickému namáhání. Při zatížení vlákna nebo plošné textilie tahem dochází k prodloužení vlákna a zúžení jeho průměru. Pevnost lze zjišťovat zkoušením jednotlivých vláken do přetrhu nebo zkoušením svazku uspořádaného z jednotlivých paralelně uspořádaných vláken až do přetrhu. Pevnost vlákna se zjišťuje na trhacím stroji, podrobnosti zkoušky jsou popsány dále. [30]

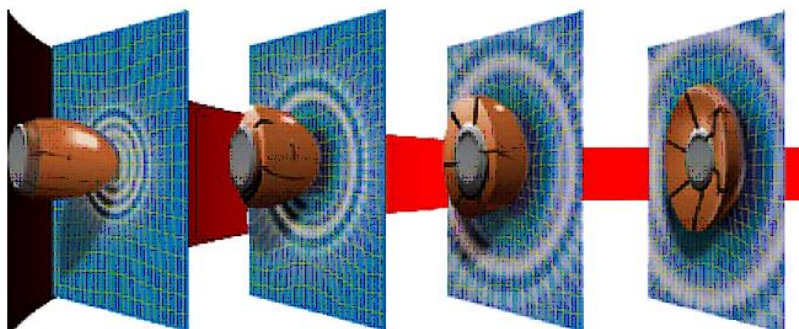


## 2.3 ELASTICITA

Elasticita neboli pružnost je schopnost vlákna se vratně deformovat. Do původního stavu se vlákno vrátí po odstranění vnější zátěže. Elasticita je stav, kdy na těleso působí více sil nebo silové dvojice, které jsou v rovnováze. Tyto síly způsobí deformaci tělesa a změny jeho tvar i velikost. [32]

## 2.4 BALISTICKÁ ODOLNOST

Balistická odolnost je jednou z nejdůležitějších vlastností, které je nutno hodnotit při výběru balistické ochrany. Jak uvádí Militký ([29], s. 378): *Absorpce kinetické energie střely souvisí s šířením podélných a příčných vln v tělese a disipací třecí energie vlivem pronikání střely do materiálu. 50 % rázové energie způsobené střelou se absorbuje šířením vln okolní vláknennou strukturou, obklopující místo vstřelu.* Na obrázku 29 je zřetelná deformace projektilu. Energie střely je pohlcována každou další vrstvou balistického materiálu. Díky spojení jednotlivých vrstev se při prostupu střely dalšími vrstvami materiálu podílí na deformaci kulky větší plocha materiálu. Díky tomuto efektu přenosu energie nedochází ke zranění vnitřních orgánů, které by ohrozilo život nositele neprůstřelné vesty. Zkoušky balistické odolnosti jsou prováděny dle přesně stanovených podmínek, které jsou uvedeny v normě ČSN 39 5360. [29, 33]



Obr. 26: Deformace projektilu při zásahu balistického materiálu [33]

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

#### 3.1 STANOVENÍ PRŮMĚRU A PRŮŘEZU VLÁKNA A TEXTILIE

Pro stanovení napětí potřebujeme znát základní parametry vlákenného svazku, kterými jsou průměr, délka, hmotnost, hustota vláken a maximální síla vybrané zkoušky.

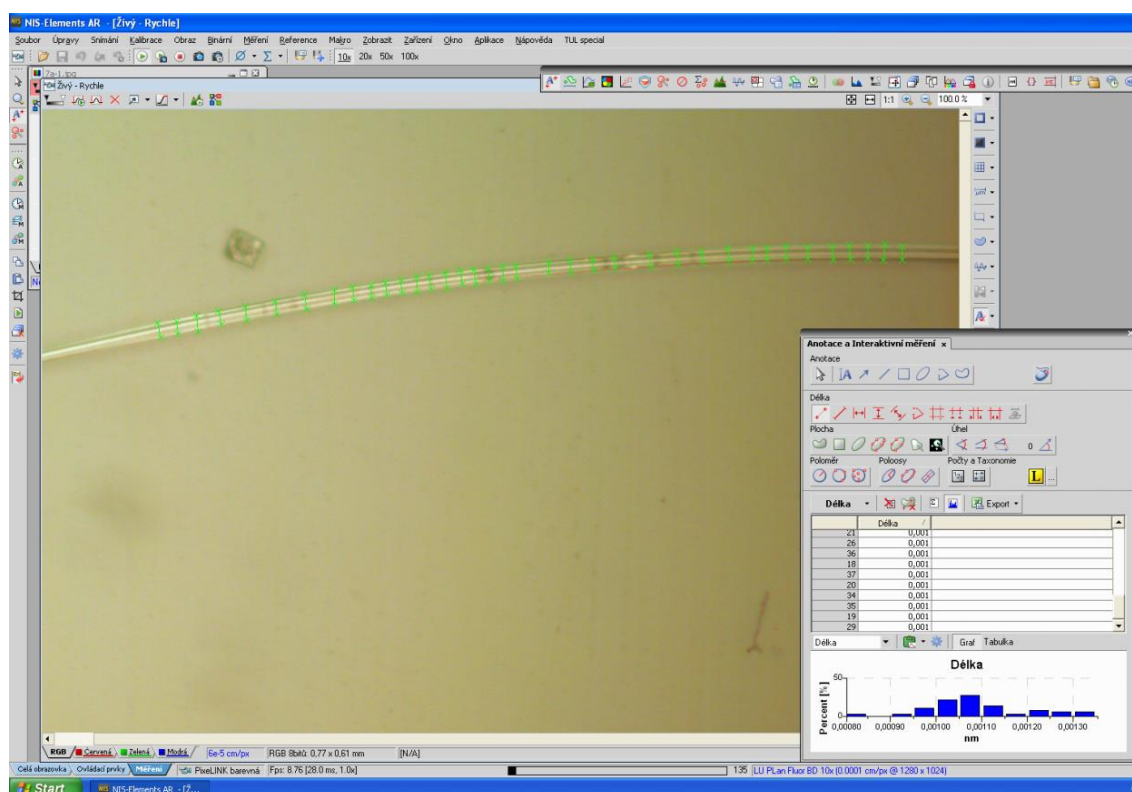
Průměr vlákna  $\underline{d}$  je stanoven pomocí optického mikroskopu, pomocí kterého se získá snímek vzorku pro následnou obrazovou analýzu vzorku. Hustota  $\underline{\rho}$  materiálu je uvedena již v rešeršní části práce. Hmotnost svazku vláken  $\underline{m}$  o délce  $\underline{v}$  je stanovena pomocí laboratorní váhy.

#### OBRAZOVÁ ANALÝZA

Obrazová analýza byla provedena pomocí optického mikroskopu Nikon Eclipse LV100 a programu NIS Elements. Bylo změřeno pět vláken. Na každém vlákně bylo provedeno 35 měření. Hodnota průměru vlákna byla zjištěna dle vzorce pro průměr z hodnot každého měření. Měření vlákna bylo provedeno v programu NIS Elements. Šířka vlákna byla měřena po jeho celé délce.



Obr. 27: Optický mikroskop Nikon Eclipse LV100



Obr. 28: Měření v programu NIS Elements

### 3.2 ZKOUŠKA PEVNOSTI V TAHU

Tahová zkouška je nejzákladnější zkouškou pro zjištění mechanických vlastností vláken. Tažnost jednotlivých vláken zkoušíme na trhacím přístroji se stálou rychlostí tažné svorky. [30]

#### Podstata zkoušky

Tahová zkouška se provádí dle normy ČSN EN ISO 13934-1, která vešla v platnost v prosinci roku 2013. Norma uvádí postup pro zjišťování maximální síly a tažnosti při maximální síle u zkušebních vzorků, které jsou v rovnováze s normálním ovzduším pro zkoušení. Zkouška spočívá v plynulém zatěžování zkoušeného vzorku až do jeho přetržení. [31]

## Příprava zkušebních vzorků

Ze vzorku textilie bylo vystříženo 5 zkušebních vzorků po osnově, 5 vzorků po útku, 3 vzorky pod úhlem  $45^\circ$  a 3 vzorky pod úhlem  $135^\circ$ . Žádný zkušební vzorek odebraný ve směru osnovy nesmí obsahovat stejné osnovní nitě, to samé platí pro útek a útkové nitě. Z důvodu omezených možností stroje byla šířka vzorku pouze 20 mm namísto 50 mm, délka vzorku byla 180 mm. [31]



*Obr. 29: Vzorky materiálu v podélném směru*

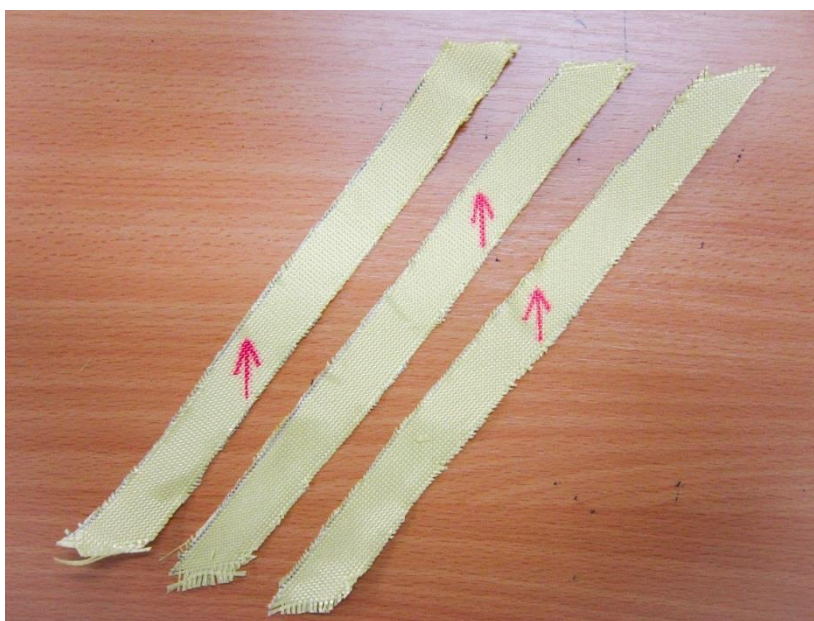


*Obr. 30: Vzorky materiálu v příčném směru*





*Obr. 31: Vzorky materiálu pod úhlem 45°*



*Obr. 32: Vzorky materiálu pod úhlem 135°*

## Postup zkoušky

Na trhačím stroji se nastaví upínací délka, v našem případě 100 mm. Zkušební vzorky byly upnuty bez předpětí. K deformaci vzorku docházelo rychlostí  $20 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . [31]

Zkušební vzorek se centrálně upne tak, aby jeho podélná střední osa procházela středem předních hran čelistí. Celý průběh zkoušky je řízen počítačem. Jeho pomocí se spustí chod čelistí, které napínají vzorek materiálu. Pohyblivá čelist se uvede do chodu a zkušební vzorek je napínán do přetrhu. Počítač zaznamenává maximální sílu a tažnost při maximální síle. [31]

## Použité materiály

Zkoušené vzorky jsou vyrobeny z kevlaru 29. Tkanina je v plátňové vazbě.

## Použitá zařízení

K přípravě vzorků byly použity speciální nůžky s vroubkovanými čelistmi od firmy Stanley. K tahové zkoušce byl použit univerzální zkušební stroj LabTest 2.050 od firmy Labortech. Pro obrazovou analýzu vlákna byl použit optický mikroskop Nikon Eclipse LV100 a program NIS Elements. Ke zvážení vlákenného svazku byla použita kalibrovaná laboratorní váha.

## STANOVENÍ PEVNOSTI TEXTILIE V TAHU

Tahová zkouška byla prováděna na univerzálním zkušebním stroji LabTest 2.050 od firmy Labortech. Při veškerých zkouškách byla dodržena norma ČSN EN ISO 13934-1. Pro účel této práce byly kevlarové vzorky zkoušeny ve směru podélném, příčném a pod úhlem  $45^\circ$  a  $135^\circ$ .

Přístroj je elektromechanický dvousloupový stroj stolního provedení. Maximální zatížení přístroje je 5 kN. Přístroj má elektrickou i mechanickou ochranu proti přetížení. Rozsah pro měření síly je od 0,4% do 100% rozsahu snímacího zařízení. Pro vyhodnocení měření se používá software nazvaný LabTest. Pro uchycení materiálu byly použity speciální vroubkované čelisti.

Upínací délka vzorku byla nastavena na 100 mm. K posuvu pohyblivé čelisti docházelo při rychlosti  $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Po uchycení vzorku materiálu se samotná zkouška spustí

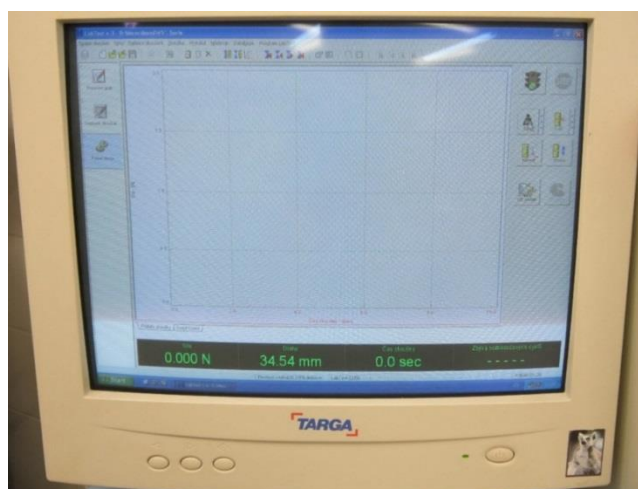
*Vliv orientace vrstev na účinnost balistické ochrany*

pomocí počítačového programu, který ovládá zařízení. V průběhu zkoušky se pohyblivá čelist oddaluje a namáhá vzorek materiálu. Jeho namáhání je ukončeno po přetrhu vzorku. Po zastavení stroje je nutné použítý vzorek vyjmout a vložit nový. Před vložením dalšího vzorku je však nutné pomocí počítače vrátit pohyblivou čelist zpět na upínací délku.

Výsledkem tahové zkoušky je graf znázorňující postup zkoušky a tabulka hodnot zkoušky. V tabulce hodnot jsou uvedeny tři veličiny.  $A_{max}$  je maximální prodloužení vzorku do přetrhu vyjádřené v milimetrech a procentech.  $F_{max}$  představuje maximální sílu při přetrhu vzorku. Poslední veličinou je napětí  $\sigma$  při maximální síle  $F_{max}$ .



*Obr. 33: Přístroj LabTest 2.050*



*Obr. 34: Software k ovládání zkušebního stroje*

## Statistické zpracování, výpočty

Pevnost vlákna v tahu a prodloužení plošné textilie se spočítá aritmetickým průměrem ze všech provedených zkoušek. Hodnoty jsou udávány v %. Vzorec pro aritmetický průměr je:  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ , kde  $\bar{x}$  je aritmetický průměr,  $n$  je počet zkoušených vláken,  $x_i$  je  $i$ -tá naměřená hodnota znaku.

Nestejnoměrnost zjištěných hodnot vyjádřená variačním koeficientem se počítá dle vzorce:  $S = \sqrt{\frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2 \right]}$ ,  $V = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100$ , kde  $S$  je směrodatná odchylka statistického souboru [mN],  $V$  je variační koeficient [%]. [30]

## VÝPOČET PRŮŘEZU VLÁKNA A TEXTILIE

Průměr vlákna je  $d = 9,55 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ , hustota vlákna je  $\rho = 1440 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , hmotnost svazku vláken je  $m_s = 0,004 \text{ g} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ kg}$ , délka zváženého svazku vláken je  $v = 36 \text{ mm} = 0,036 \text{ m}$ , dostava tkaniny je  $10 \text{ nití} \cdot \text{cm}^{-1}$ .

**Hmotnost jednoho vlákna** odvodíme pomocí vzorce pro výpočet hustoty.

$$\rho = \frac{m}{V} \rightarrow m = \rho \cdot V = \rho \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v$$

$$m_v = 1440 \cdot \frac{\pi \cdot (9,55 \cdot 10^{-6})^2}{4} \cdot 0,036 = 3,713 \cdot 10^{-9} \text{ kg}$$

**Počet vláken ve svazku** získáme dosazením jednotlivých hmotností do vzorce.

$$P = \frac{m_s}{m_v} = \frac{4 \cdot 10^{-6}}{3,713 \cdot 10^{-9}} = 1\,077 \text{ vláken}$$

Počet vláken v 2 cm textilie:

$$P = 1077 \cdot 20 = 21\,540 \text{ vláken}$$

**Průřez S** odvodíme pomocí vzorce pro výpočet obsahu kruhu, který rozšíříme o počet vláken ve vzorku.

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \text{počet v } 2 \text{ cm} = \frac{\pi \cdot (9,55 \cdot 10^{-6})^2}{4} \cdot 21540 = 1,543 \cdot 10^{-6}$$



### 3.3 VÝSLEDKY TAHOVÉ ZKOUŠKY V PODÉLNÉM SMĚRU

Bylo provedeno 5 zkoušek. Při přípravě vzorků bylo dodržováno pravidlo, že žádný vzorek nebude obsahovat stejné osnovní nitě.

Tabulka 8: Hodnoty jednotlivých zkoušek pro podélný směr

Zkouška	Amax	Fmax	Amax	Fmax	$\sigma$
	%	MPa	mm	N	MPa
1	12,32	180,15	7,39	3602,95	2335
2	12,32	178,61	7,39	3572,19	2315
3	12,93	196,29	7,76	3925,83	2544
4	12,21	185,34	7,32	3706,79	2402
5	11,98	201,62	7,19	4032,39	2613

Tabulka 9: Statistika z celkového počtu zkoušek pro podélný směr

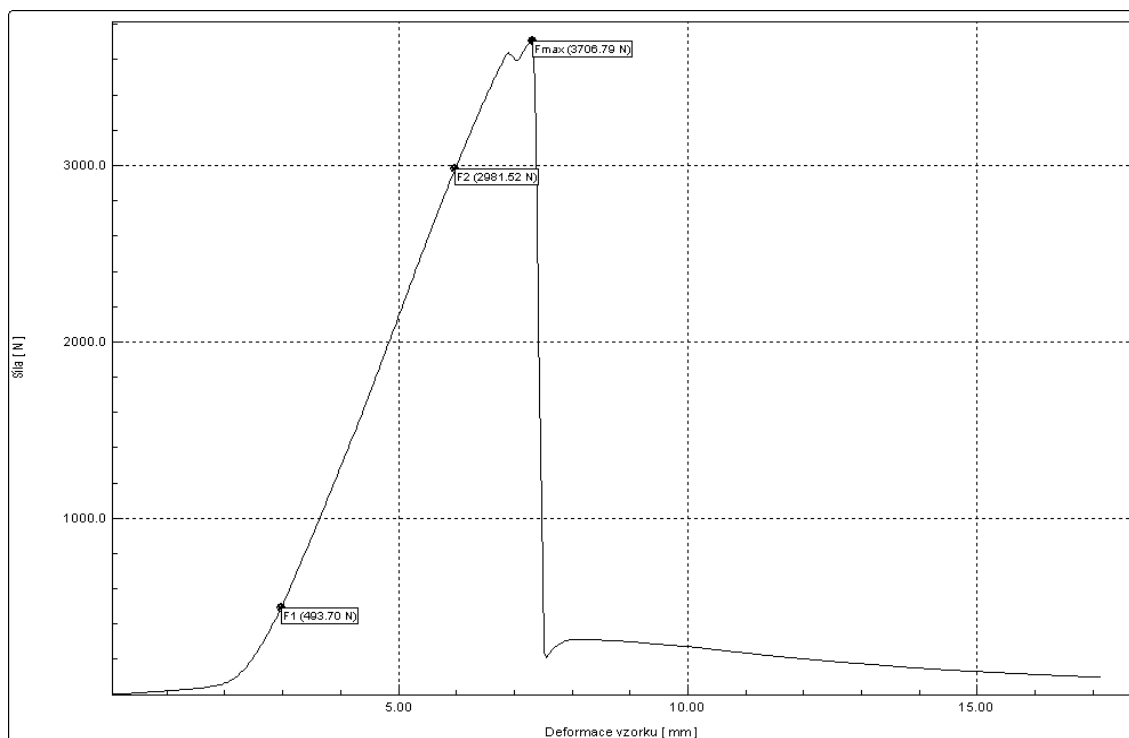
Statistika	Amax	Fmax	Amax	Fmax
	%	MPa	mm	N
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota zkoušek	12,35	188,4	7,41	3768,03
Směrodatná odchylka zkoušek	0,35	10,13	0,21	202,57
Variační koeficient zkoušek	2,85	5,38	2,85	5,38
Minimální hodnota zkoušek	11,98	178,61	7,19	3572,19
Maximální hodnota zkoušek	12,93	201,62	7,76	4032,39



Obr. 35: Vzorek před zkouškou a po zkoušce

Bylo provedeno 5 zkoušek. Maximální síla potřebná pro přetržení vzorku byla 4032,39 N. Minimální síla potřebná pro přetržení vzorku byla 3572,19 N. Rozdíl mezi těmito dvěma extrémů je 460,2 N. Průměrná hodnota síly potřebné k přetržení podélného vzorku materiálu je 3768,03 N. Průměrná hodnota prodloužení vzorku při přetrhu je 7,41 mm.

## Graf zkoušky



Graf 4: Podélný směr - 4. vzorek

Graf je tvořen dvěma částmi, posuvem dráhou  $s$  [mm] a silou  $F$  [N]. S vzrůstajícím posuvem stoupá síla přes mez kluzu až do přetržení a pak prudce klesá. Zobrazený graf zkoušky zastupuje průměrnou hodnotu síly potřebnou k přetrhu vzorku. Z grafu je zřejmé, že  $F_{\max}$  je síla, při které dojde k přetrhu vzorku.

### 3.4 VÝSLEDKY TAHOVÉ ZKOUŠKY V PŘÍČNÉM SMĚRU

Bylo provedeno 5 zkoušek. Při přípravě vzorků bylo dodržováno pravidlo, že žádný vzorek nebude obsahovat stejné útkové nitě.

Tabulka 10: Hodnoty jednotlivých zkoušek pro příčný směr

Zkouška	Amax	Fmax	Amax	Fmax	$\sigma$
	%	MPa	mm	N	MPa
1	12,61	214,25	7,57	4285,04	2777
2	8,28	209,14	4,97	4182,86	2711
3	9,71	207,8	5,82	4155,91	2693
4	8,32	204,48	4,99	4089,6	2650
5	10,42	215,56	6,25	4311,11	2794

Tabulka 11: Statistika z celkového počtu zkoušek pro příčný směr

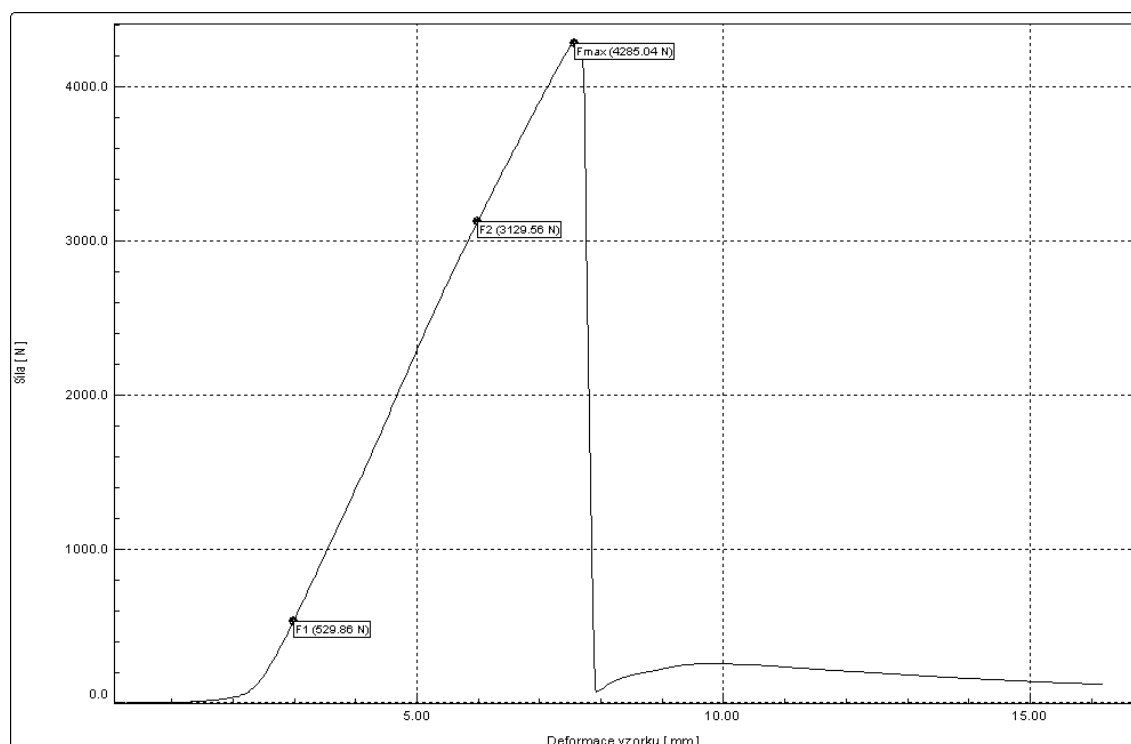
Statistika	Amax	Fmax	Amax	Fmax
	%	MPa	mm	N
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota zkoušek	9,87	210,25	5,92	4204,91
Směrodatná odchylka zkoušek	1,79	4,6	1,07	92,04
Variační koeficient zkoušek	18,11	2,19	18,11	2,19
Minimální hodnota zkoušek	8,28	204,48	4,97	4089,6
Maximální hodnota zkoušek	12,61	215,56	7,57	4311,11



Obr. 36: Vzorek před zkouškou a po zkoušce

Bylo provedeno 5 zkoušek. Maximální síla potřebná pro přetržení vzorku byla 4311,11 N. Minimální síla potřebná pro přetržení vzorku byla 4089,6 N. Rozdíl mezi těmito dvěma extrémy je 221,51 N. Průměrná hodnota síly potřebné k přetržení příčného vzorku materiálu je 4204,91 N. Průměrná hodnota prodloužení vzorku při přetrhu je 5,92 mm.

## Graf zkoušky



Graf 5: Příčný směr - 1. vzorek

Graf je tvořen dvěma částmi, posuvem dráhou  $s$  [mm] a silou  $F$  [N]. S vzrůstajícím posuvem stoupá síla přes mez kluzu až do přetržení a pak prudce klesá. Zobrazený graf zkoušky zastupuje průměrnou hodnotu síly potřebnou k přetrhu vzorku. Z grafu je zřejmé, že  $F_{max}$  je síla, při které dojde k přetrhu vzorku.

Vzorek v příčném směru dosahuje vyšších hodnot síly nutné pro přetržení vzorku než vzorek v podélném směru. Rozdíl průměrných hodnot v obou směrech je 436,88 N. Tento jev je relativně nezvyklý. Ve většině tkanin je osnova pevnější než útek, protože při tkacím procesu dochází k většímu namáhání osnovních nití.

### 3.5 VÝSLEDKY TAHOVÉ ZKOUŠKY V DIAGONÁLNÍM SMĚRU (45°)

Byly provedeny 3 zkoušky. Správnost směru při přípravě těchto vzorků byla ověřena úhломěrem.

Tabulka 12: Hodnoty jednotlivých zkoušek pro směr v úhlu 45°

Zkouška	A <sub>max</sub>	F <sub>max</sub>	A <sub>max</sub>	F <sub>max</sub>	$\sigma$
	%	MPa	mm	N	MPa
1	22,48	1,99	13,49	39,82	25,8
2	25,37	2,58	15,22	51,57	33,4
3	28,58	2,3	17,15	45,96	29,7

Tabulka 13: Statistika z celkového počtu zkoušek pro směr v úhlu 45°

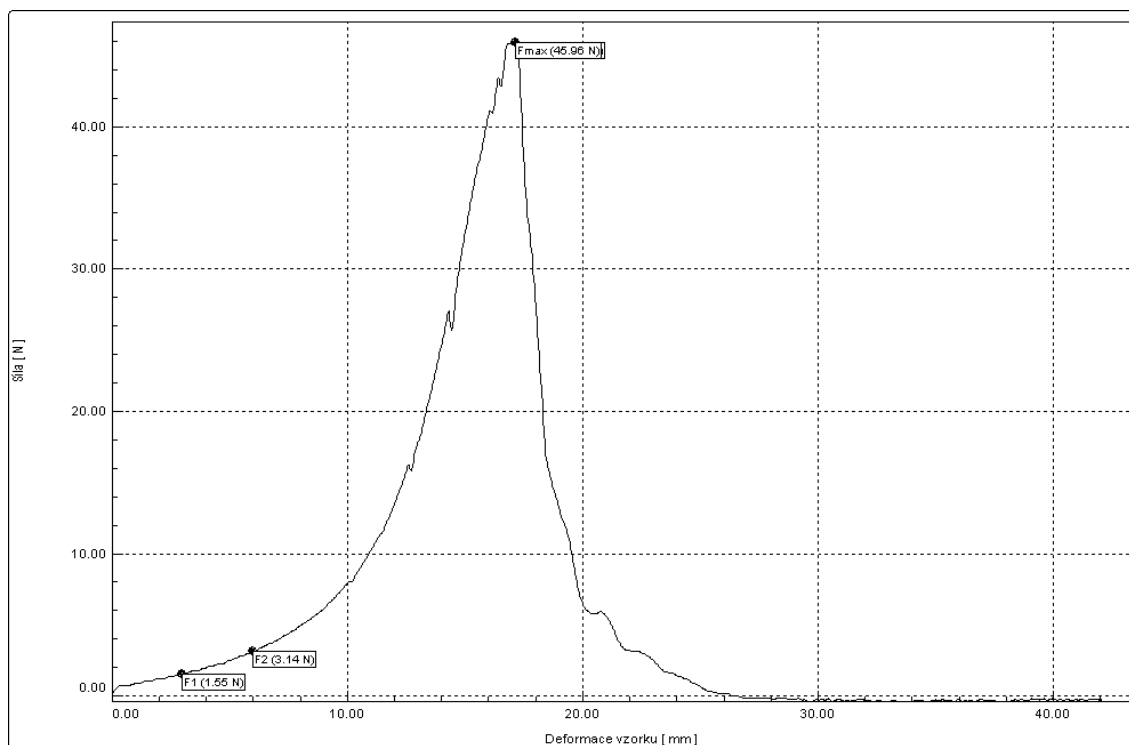
Statistika	A <sub>max</sub>	F <sub>max</sub>	A <sub>max</sub>	F <sub>max</sub>
	%	MPa	mm	N
Počet zkoušek	3	3	3	3
Průměrná hodnota zkoušek	25,48	2,29	15,29	45,78
Směrodatná odchylka zkoušek	3,05	0,30	1,83	5,88
Variační koeficient zkoušek	11,97	13,1	11,97	12,84
Minimální hodnota zkoušek	22,48	1,99	13,49	39,82
Maximální hodnota zkoušek	28,58	2,58	17,15	51,57



Obr. 37: Vzorek před zkouškou a po zkoušce

Byly provedeny 3 zkoušky. Maximální síla potřebná pro přetržení vzorku byla 51,57 N. Minimální síla potřebná pro přetržení vzorku byla 39,82 N. Rozdíl mezi těmito dvěma extrémy je 11,75 N. Průměrná hodnota síly potřebné k přetržení vzorku materiálu je 45,78 N. Pevnost v diagonálním směru je ovlivněna ortogonálním uspořádáním tkaniny.

## Graf zkoušky



Graf 6: Směr pod úhlem 45° - 3. vzorek

Graf je tvořen dvěma částmi, posuvem dráhou  $s$  [mm] a silou  $F$  [N]. S vzrůstajícím posuvem stoupá síla přes mez kluzu až do přetržení a pak prudce klesá. Zobrazený graf zkoušky zastupuje průměrnou hodnotu síly potřebnou k přetrhu vzorku. Z grafu je zřejmé, že  $F_{max}$  je síla, při které dojde k přetrhu vzorku.

### 3.6 VÝSLEDKY TAHOVÉ ZKOUŠKY V DIAGONÁLNÍM SMĚRU (135°)

Byly provedeny 3 zkoušky. Správnost směru při přípravě těchto vzorků byla ověřena úhломěrem.

Tabulka 14: Hodnoty jednotlivých zkoušek pro směr v úhlu 135°

Zkouška	A <sub>max</sub> %	F <sub>max</sub> MPa	A <sub>max</sub> mm	F <sub>max</sub> N	σ MPa
1	36,21	1,62	21,73	32,38	20,9
2	32,54	2,04	19,53	40,85	26,5
3	35,85	1,64	21,51	32,77	21,2

Tabulka 15: Statistika z celkového počtu zkoušek pro směr v úhlu 135°

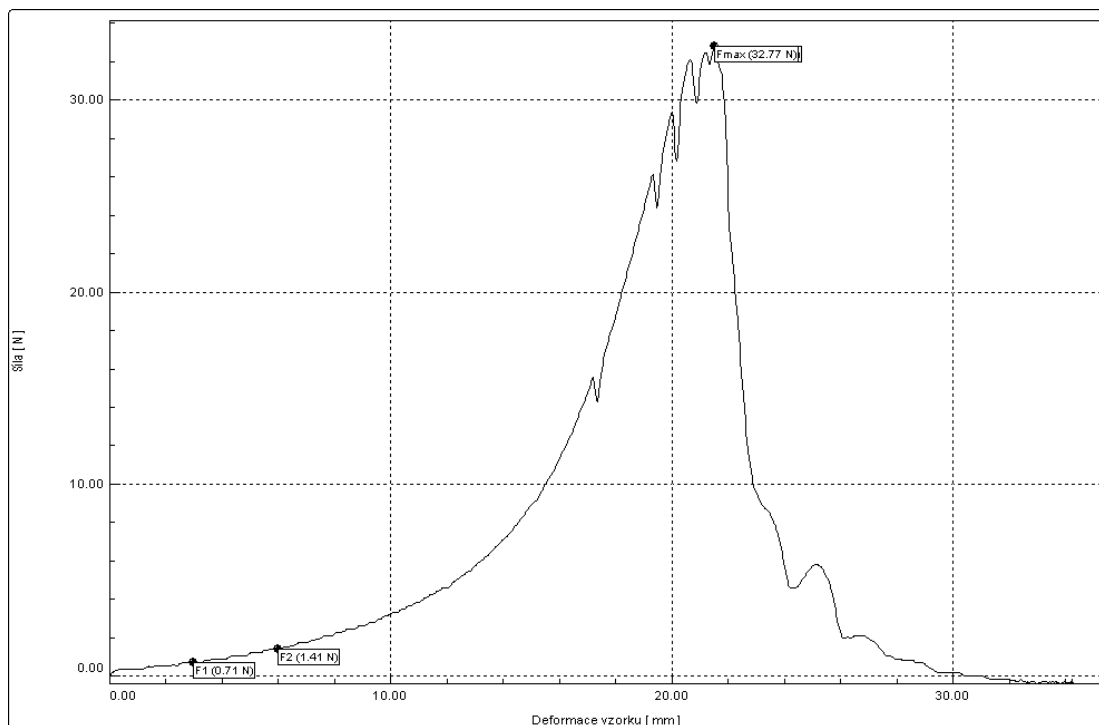
Statistika	A <sub>max</sub> %	F <sub>max</sub> MPa	A <sub>max</sub> mm	F <sub>max</sub> N
Počet zkoušek	3	3	3	3
Průměrná hodnota zkoušek	34,87	1,77	20,92	35,33
Směrodatná odchylka zkoušek	2,02	0,24	1,21	4,78
Variační koeficient zkoušek	5,79	13,56	5,78	13,53
Minimální hodnota zkoušek	32,54	1,62	19,53	32,38
Maximální hodnota zkoušek	36,21	2,04	21,73	40,85



Obr. 38: Vzorek před zkouškou a po zkoušce

Byly provedeny 3 zkoušky. Maximální síla potřebná pro přetržení vzorku byla 40,85 N. Minimální síla potřebná pro přetržení vzorku byla 32,38 N. Rozdíl mezi těmito dvěma extrémy je 8,47 N. Průměrná hodnota síly potřebné k přetržení vzorku materiálu je 35,33 N. Pevnost v diagonálním směru je ovlivněna ortogonálním uspořádáním tkaniny.

## Graf zkoušky



*Graf 7: Směr pod úhlem 135° - 3. vzorek*

Graf je tvořen dvěma částmi, posuvem dráhou  $s$  [mm] a silou  $F$  [N]. S vzrůstajícím posuvem stoupá síla přes mez kluzu až do přetržení a pak prudce klesá. Zobrazený graf zkoušky zastupuje průměrnou hodnotu síly potřebnou k přetrhu vzorku. Z grafu je zřejmé, že  $F_{max}$  je síla, při které dojde k přetrhu vzorku.

Z naměřených výsledků je zřetelná pevnost materiálu ve směru příčném a podélném. Nejvyšší pevnosti dosahoval vzorek v příčném směru a to 4311,11 N. V podélném směru byla naměřena nejvyšší síla 4032,39 N. V diagonálním směru bylo nejvíce naměřeno 51,57 N.

*Tabulka 16: Průměrné hodnoty síly ve všech směrech*

<i>Směr / hodnota</i>	<i>Podélný</i>	<i>Příčný</i>	<i>Diagonální 45°</i>	<i>Diagonální 135°</i>
<b><i>F<sub>max</sub></i></b>	3768,03 N	4204,91 N	45,78 N	35,33 N



## 4 POČÍTAČOVÁ SIMULACE

Počítačová simulace je simulace, při které se modelem stává počítačový program. Cílem simulačního programu je zjistit chování materiálu dle zadaných vstupních dat. Pomocí simulačních experimentů s různými vstupními hodnotami je možné zjistit optimální řešení daného problému. [34]

Simulační program Ansys je celosvětově nejpoužívanější software pro technické simulace. Software pracuje s metodou konečných prvků.

### 4.1 STANOVENÍ HODNOT PRO MATERIÁLOVÝ MODEL

Pro správnou funkčnost simulace bylo zapotřebí vytvořit materiálový model, do kterého byly vkládány materiálové vlastnosti: hustota  $\rho = 1440 \text{ [kg/m}^3\text{]}$  a ortotropní elasticita materiálu. Ortotropní elasticita vyžadovala zjištění Youngova modulu  $[E]$  v každém směru X, Y, Z, který byl z naměřených hodnot pro každý směr samostatně vypočítán (1). Dále bylo nutné stanovit Poissonovo číslo, které bylo stanoveno ve směrech XY, YZ, XZ. Do vzorce (2) byly postupně dosazovány hodnoty příčné deformace a podélná nebo axiální deformace. Pro stanovení Smykového modulu ve směru YZ, XZ byl použit vzorec (3), do kterého byly vloženy určené vlastnosti Youngova modulu a Poissonova čísla. Pro stanovení Youngova modulu byly zprůměrovány maximální hodnoty napětí a deformace ve všech směrech a byly vloženy do vzorců. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 17.

$$E = \frac{\sigma_{prům}}{\frac{\Delta l}{100}} \quad (4.1)$$

Kde: E - Youngův Modul  
 $\sigma_{prům}$  - průměrné napětí  
 $\Delta l$  - průměrná deformace

$$u = \frac{-\varepsilon_t}{\varepsilon_l} \quad (4.2)$$

Kde: u - Poissonovo číslo  
 $\varepsilon_t$  - příčná deformace  
 $\varepsilon_l$  - podélná nebo axiální def.

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + u)} \quad (4.3)$$

Kde:  $G$  - Smykový modul  
 $\nu$  - Poissonovo číslo

Tabulka 17: Tabulka materiálových hodnot pro ortotropní materiál

Youngův modul			Poissonovo číslo			Smykový modul		
X	Y	Z	XY	YZ	XZ	XY	YZ	XZ
[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
32952	46030	193,8	0.36	0.36	0.36	17476	23015	96,92

## 4.2 SIMULACE TAHOVÉ ZKOUŠKY

Určení materiálového modelu bylo ověřeno tvorbou simulačního modelu tahové zkoušky a jejího porovnání se zkouškou reálnou. Do modelu o rozměrech 100x20x1mm byly vloženy orthotropní vlastnosti materiálového modulu z experimentálně získaných hodnot. Dále byla vytvořena síť o rozměrech 6363 uzlů 4000 prvků. Model byl opatřen okrajovými podmínkami. Na jednom kraji byl model zafixován proti posunu ve všech směrech, na druhém kraji byl aplikován lineární posun, který odpovídá rychlosti 10 mm.min<sup>-1</sup>.

## VÝPOČET NAPĚTÍ $\sigma$

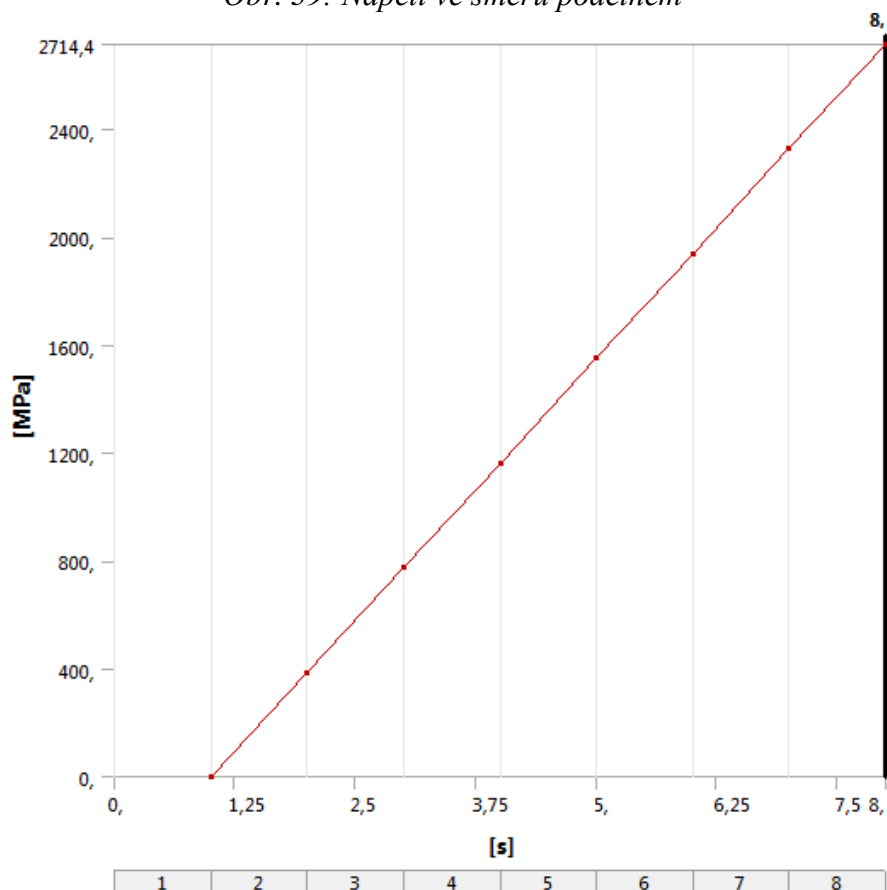
Výpočet napětí je nutný pro simulační program. Vzorec pro napětí vychází z průřezu textilie a hodnot tahové zkoušky. Průřez  $S$  je spočítán na straně 38 a maximální síla každé zkoušky je uvedena v tabulce jednotlivých zkoušek. Hodnoty jsou počítány pro každou zkoušku samostatně a jsou uvedeny v tabulce u příslušných zkoušek.

$$\sigma = \frac{F_{max}}{S}$$

## MECHANICKÁ ZKOUŠKA V PROGRAMU ANSYS V PODÉLNÉM SMĚRU



Obr. 39: Napětí ve směru podélném



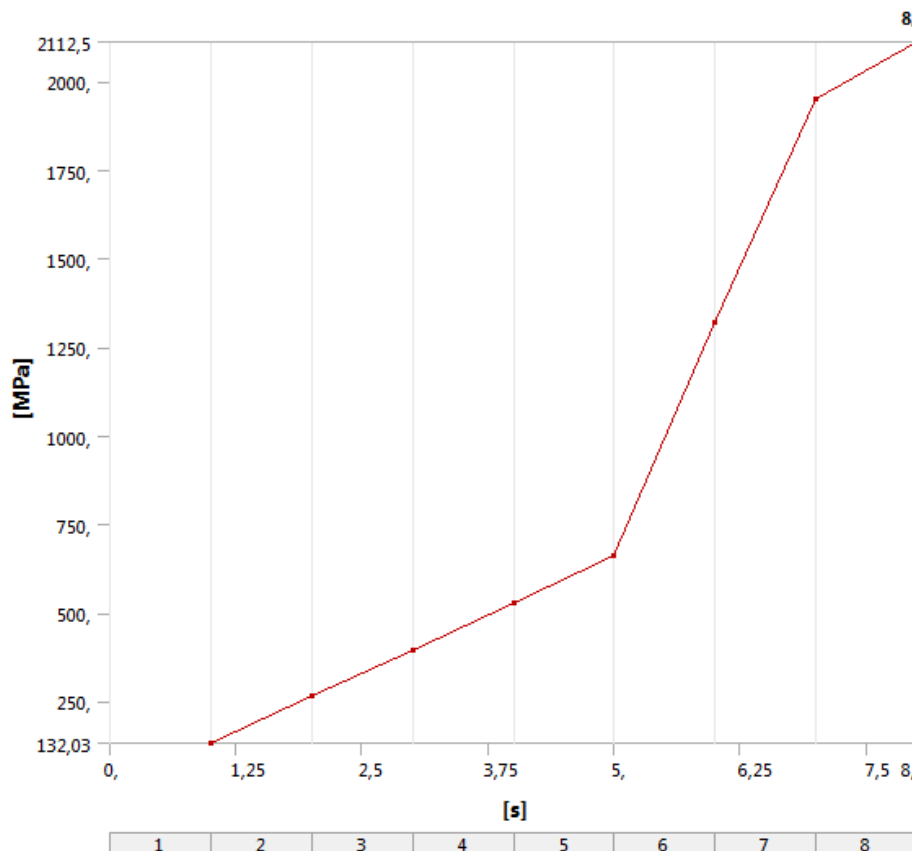
Graf 8: Maximální napětí ve směru podélném

Ze získaných výsledků simulované tahové zkoušky lze potvrdit, že vypočítané moduly napětí odpovídají reálné tahové zkoušce. Při porovnání grafu 8 s grafem 4 (str. 40), který zastupuje průměrné hodnoty zkoušky, je zřejmé, že prodloužení vzorku při zkoušce je stejné a hodnota napětí odpovídá průměrnému napětí zkoušek.

## MECHANICKÁ ZKOUŠKA V PROGRAMU ANSYS V PŘÍČNÉM SMĚRU



Obr. 40: Napětí ve směru příčném



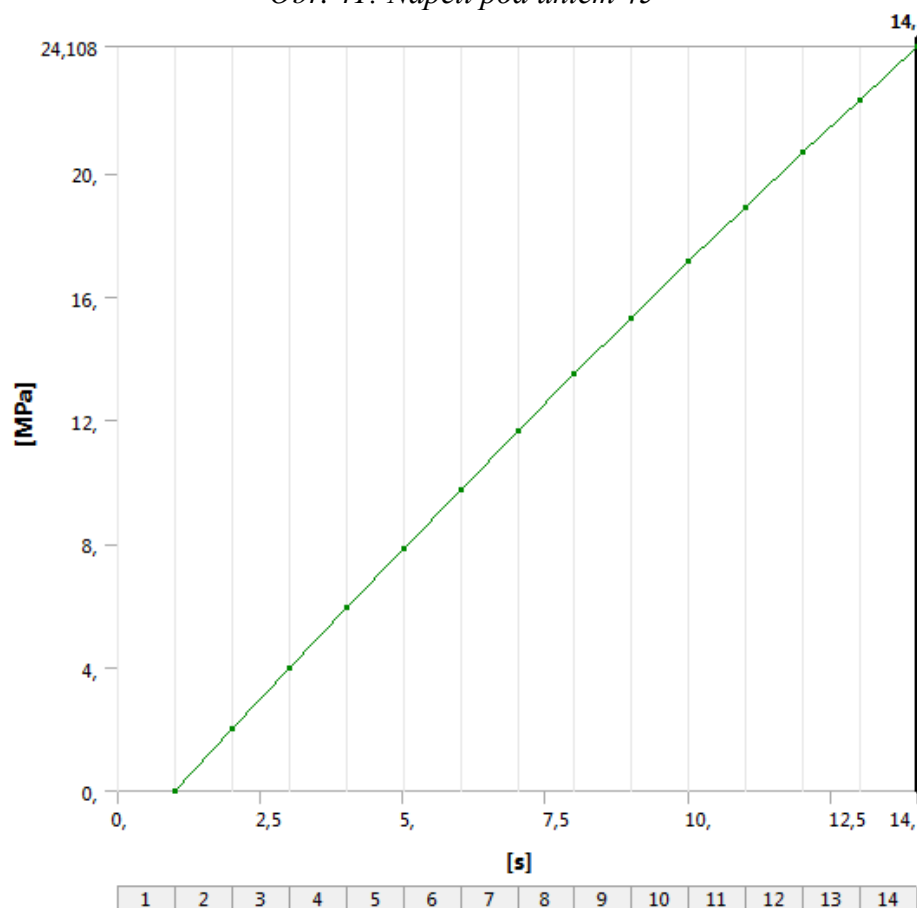
Graf 9: Maximální napětí ve směru příčném

Ze získaných výsledků simulované tahové zkoušky lze potvrdit, že vypočítané moduly napětí odpovídají reálné tahové zkoušce. Při porovnání grafu 9 s grafem 5 (str. 42), který zastupuje průměrné hodnoty zkoušky, je zřejmé, že prodloužení vzorku při zkoušce je stejné a hodnota napětí odpovídá průměrnému napětí zkoušek.

## MECHANICKÁ ZKOUŠKA V PROGRAMU ANSYS POD ÚHLEM 45°



Obr. 41: Napětí pod úhlem 45°



Graf 10: Maximální napětí pod úhlem 45°

Ze získaných výsledků simulované tahové zkoušky lze potvrdit, že vypočítané moduly napětí odpovídají reálné tahové zkoušce. Při porovnání grafu 10 s grafem 6 (str. 44), který zastupuje průměrné hodnoty zkoušky, je zřejmé, že prodloužení vzorku při zkoušce je stejné a hodnota napětí odpovídá průměrnému napětí zkoušek.

Tabulka 18: Naměřené hodnoty

	Vypočítané napětí $\sigma$ [MPa]	Simulované napětí $\sigma$ [MPa]
<b>Podélný směr</b>	2725	2714
<b>Příčný směr</b>	2141	2112
<b>Diagonální směr (45°)</b>	26,6	24

Vliv orientace vrstev na účinnost balistické ochrany

### 4.3 SIMULACE INTERAKCE STŘELY A TEXTILIÍ

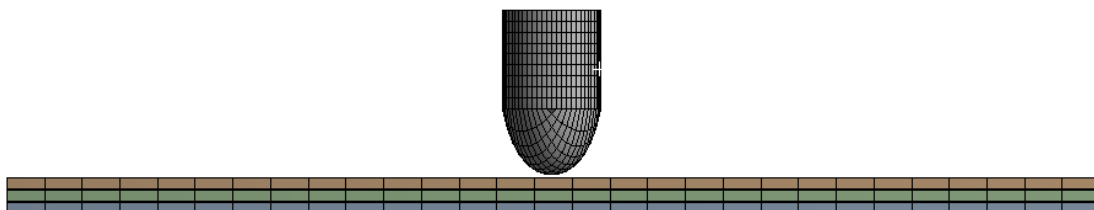
Střelba je dynamickým dějem, tedy dějem, který probíhá za vysoké deformační rychlosti. Simulace, která umožňuje testování velkého počtu variant a jejich vzájemné porovnání. Pomocí sestaveného modelu lze testovat chování v různých podmínkách a tím dojít k řešení daného problému. Přináší rychlejší a efektivnější řešení návrhů v praxi. Princip je v podstatě jednoduchý: místo sledování dynamického procesu, který nás zajímá, a jeho reakce na provedené změny sledujeme chování daného modelu. [35]

K této simulaci byl vytvořen třívrstvý 3D model, do kterého naráží projektil vysokou rychlostí. Vrstvy jsou na sebe pokládány v různých směrech, aby byla zjištěna nejvhodnější orientace vláken materiálu. Třívrstvý model je na krajích zafixován proti posuvu ve všech směrech. Jednotlivé vrstvy mají mezi sebou lepený kontakt. Jednotlivé vrstvy mezi sebou mají třecí koeficient 0,1. Dynamický koeficient tření mezi první vrstvou zkušebního vzorku a projektilu má hodnotu 0,3.

Rozměry projektilu odpovídají reálné střele, do které byly vloženy vlastnosti střeleckého olova. Rozměry projektilu jsou: průměr střely  $D = 9 \text{ mm}$  a délka  $l = 12 \text{ mm}$ . Do modelu projektilu byly zavedeny okrajové podmínky, jimiž jsou rychlost  $340 \text{ m.s}^{-1}$  a rotace. Rotace je Angulární o  $1115 \text{ ot.s}^{-1} = 7000 \text{ rad.s}^{-1}$ . Rozměry vrstev jsou  $100 \times 100 \times 1 \text{ mm}$ .

#### Sít' modelu

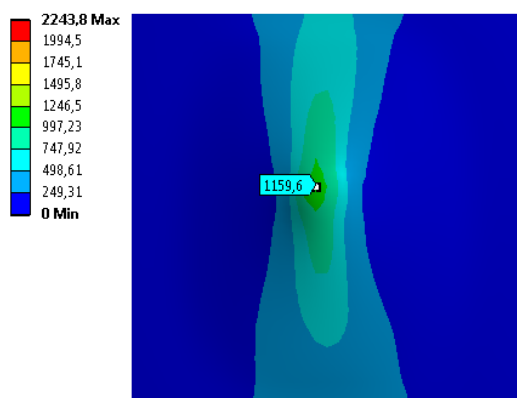
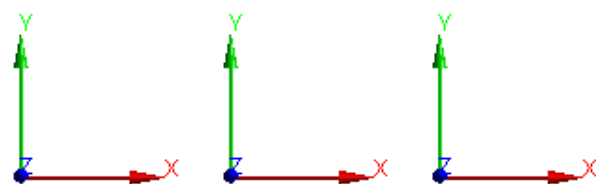
Třívrstvý zkušební vzorek je tvořen 3600 prvky a 7397 uzly. Projektil je tvořen 576 prvky a 810 uzly.



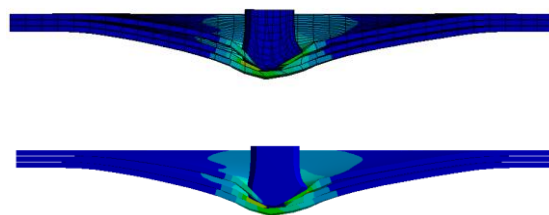
Obr. 42: Zesíťovaný třívrstvý model a projektil 9 mm

## SIMULACE VZORKU S ORIENTACÍ VRSTEV $0^\circ, 0^\circ, 0^\circ$

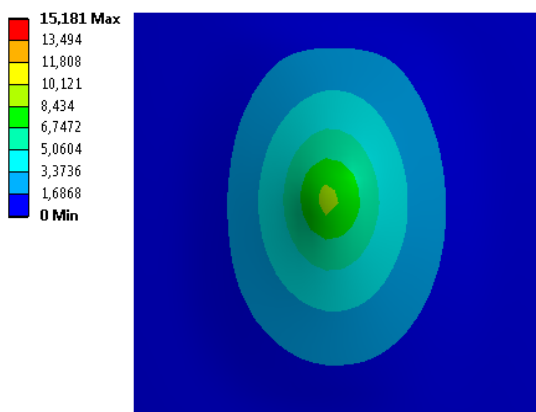
Podélný směr vzorku byl u všech vrstev orientován ve směru osy y.



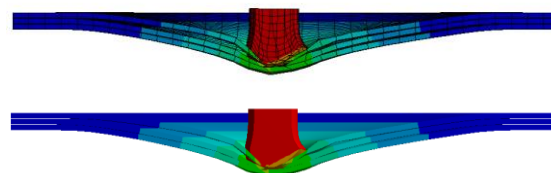
Obr. 43: Maximální napětí se stejnou orientací vrstev



Obr. 44: Maximální napětí se stejnou orientací vrstev v řezu



Obr. 45: Maximální deformace ve vrstvách

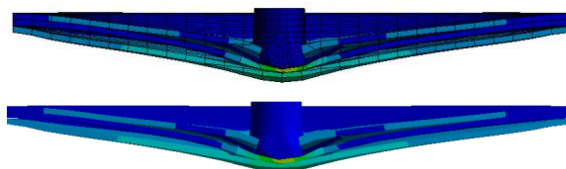
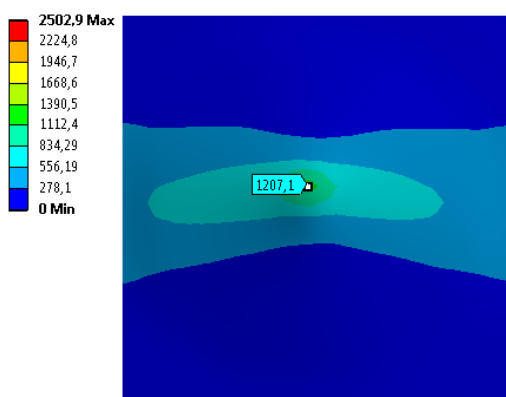
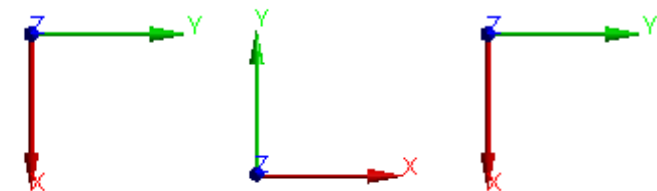


Obr. 46: Maximální deformace vrstev v řezu

Simulací vzorku s orientací vrstev  $0^\circ, 0^\circ, 0^\circ$  ve stanovené deformaci 15 mm, bylo pozorováno napětí 1159,6 MPa.

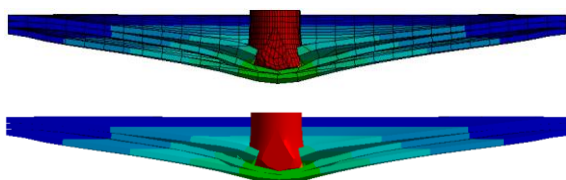
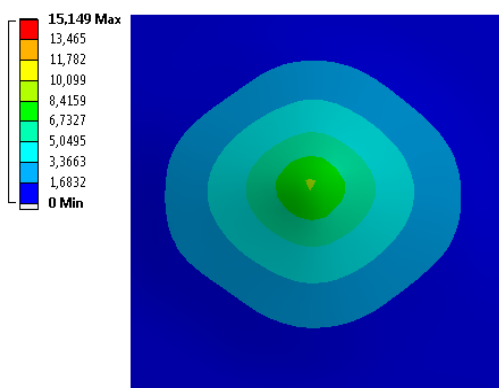
## SIMULACE VZORKU S ORIENTACÍ VRSTEV $90^\circ$ , $0^\circ$ , $90^\circ$

V třívrstvěném zkušebním vzorku byla změněna orientace ve vrstvách 1 a 3 o  $90^\circ$ , druhá vrstva byla orientovaná do osy y.



Obr. 47: Maximální napětí ve vrstvách

Obr. 48: Maximální napětí vrstev v řezu



Obr. 49: Maximální deformace ve vrstvách

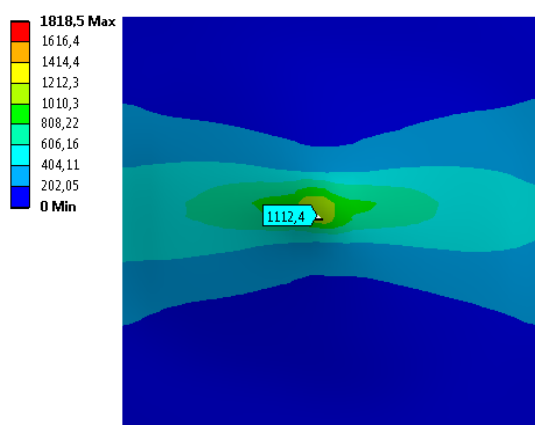
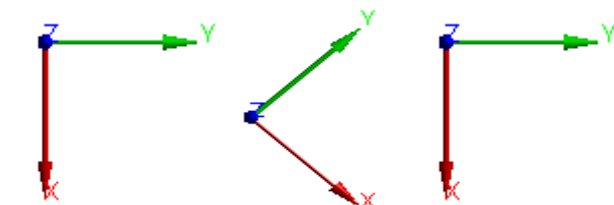
Obr. 50: Maximální deformace vrstev v řezu

Simulací vzorku s orientací vrstev  $90^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  ve stanovené deformaci 15 mm, bylo pozorováno napětí 1207,1 MPa.

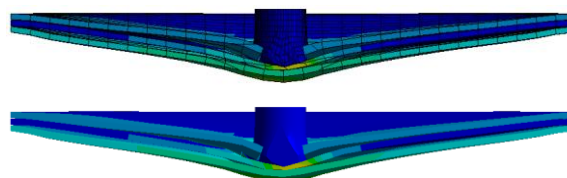


## SIMULACE VZORKU S ORIENTACÍ VRSTEV 90°, 45°, 90°

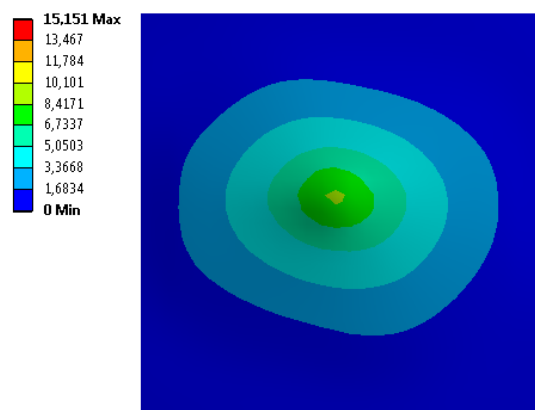
V třívrstvěném zkušebním vzorku byla změněna orientace v druhé vrstvě o 45°, první a třetí vrstva byla orientovaná do osy x.



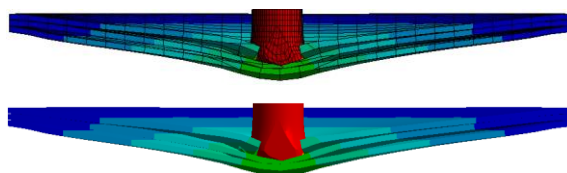
Obr. 51: Maximální napětí ve vrstvách



Obr. 52: Maximální napětí vrstev v řezu



Obr. 53: Maximální deformace ve vrstvách

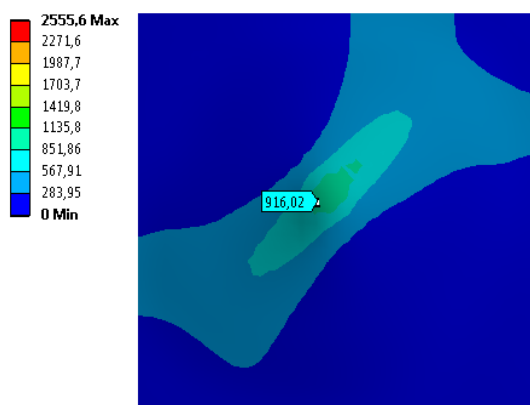
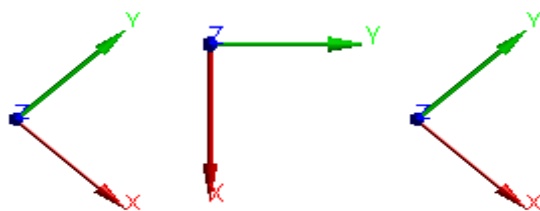


Obr. 54: Maximální deformace vrstev v řezu

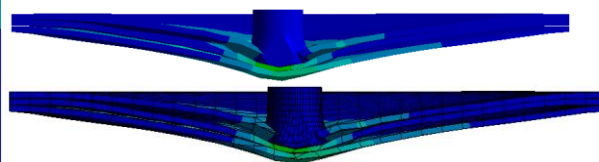
Simulací vzorku s orientací vrstev 90°, 45°, 90° ve stanovené deformaci 15 mm, bylo pozorováno napětí 1112,4 MPa.

## SIMULACE VZORKU S ORIENTACÍ VRSTEV 45°, 90°, 45°

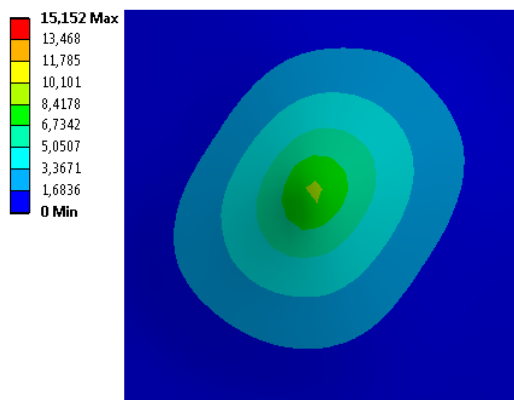
V třívrstvěném zkušebním vzorku byla změněna orientace u první a třetí vrstvy o 45°, druhá vrstva byla orientovaná do osy x.



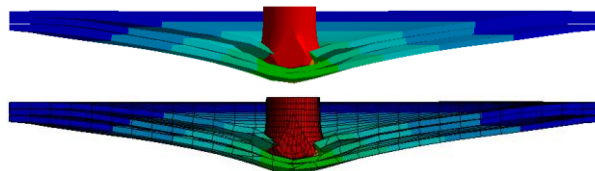
Obr. 55: Maximální napětí ve vrstvách



Obr. 56: Maximální napětí vrstev v řezu



Obr. 57: Maximální deformace ve vrstvách

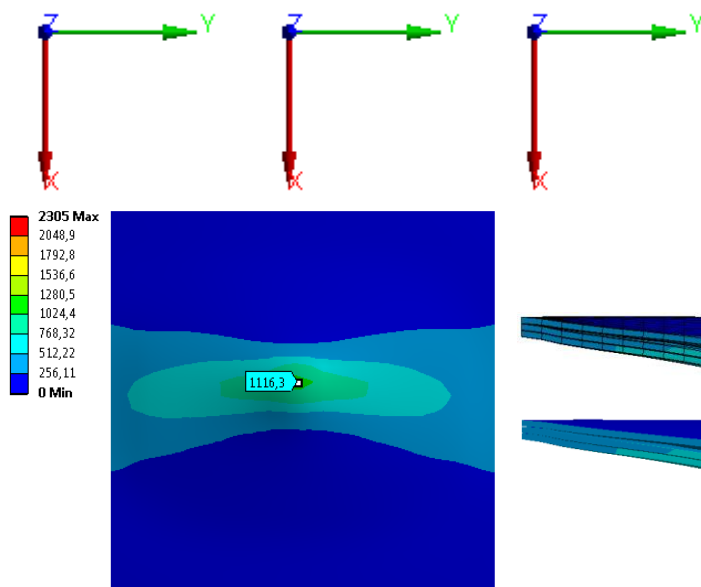


Obr. 58: Maximální deformace vrstev v řezu

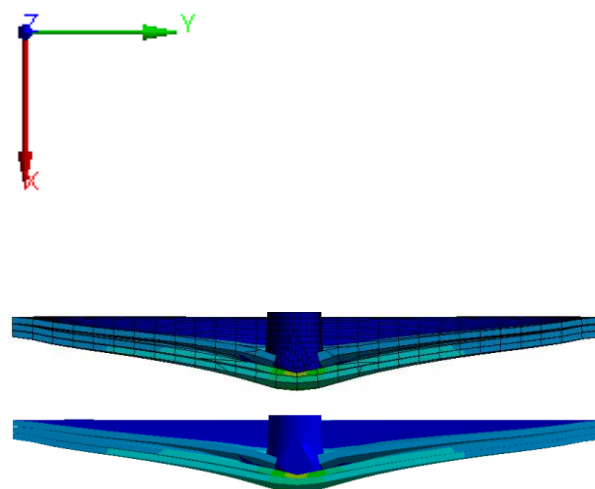
Simulací vzorku s orientací vrstev 45°, 90°, 45° ve stanovené deformaci 15 mm, bylo pozorováno napětí 916 MPa.

## SIMULACE VZORKU S ORIENTACÍ VRSTEV 90°, 90°, 90°

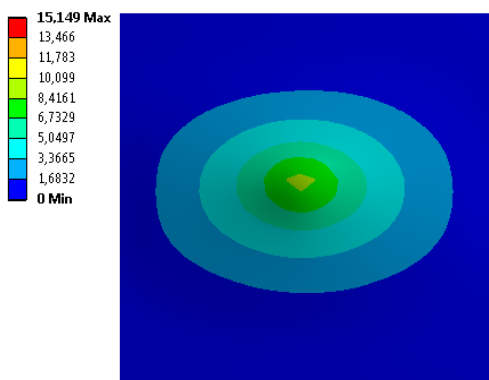
Podélný směr vzorku byl u všech vrstev orientován ve směru osy x.



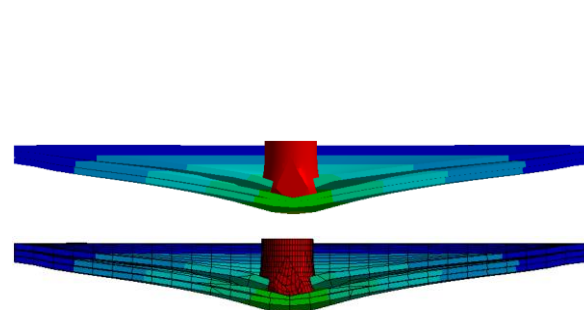
Obr. 59: Maximální napětí se stejnou orientací vrstev



Obr. 60: Maximální napětí se stejnou orientací vrstev v řezu



Obr. 61: Maximální deformace ve vrstvách



Obr. 62: Maximální deformace vrstev v řezu

Simulací vzorku s orientací vrstev 90°, 90°, 90° ve stanovené deformaci 15 mm, bylo pozorováno napětí 1116,3 MPa.

## DISKUZE VÝSLEDKŮ

Jednotlivé zkoušky byly provedeny při různé orientaci vzorků s cílem zjistit, jak tato orientace ovlivní výsledné hodnoty napětí působícího na projektil. Výsledky jsou uvedené v tabulce 19.

Tabulka 19: Naměřené hodnoty

Orientace vrstev	Naměřené napětí [MPa]	Stanovená deformace [mm]
0°, 0°, 0°	1159,6	15
90°, 0°, 90°	1207,1	15
90°, 45°, 90°	1112,4	15
45°, 90°, 45°	916,02	15
90°, 90°, 90°	1116,3	15

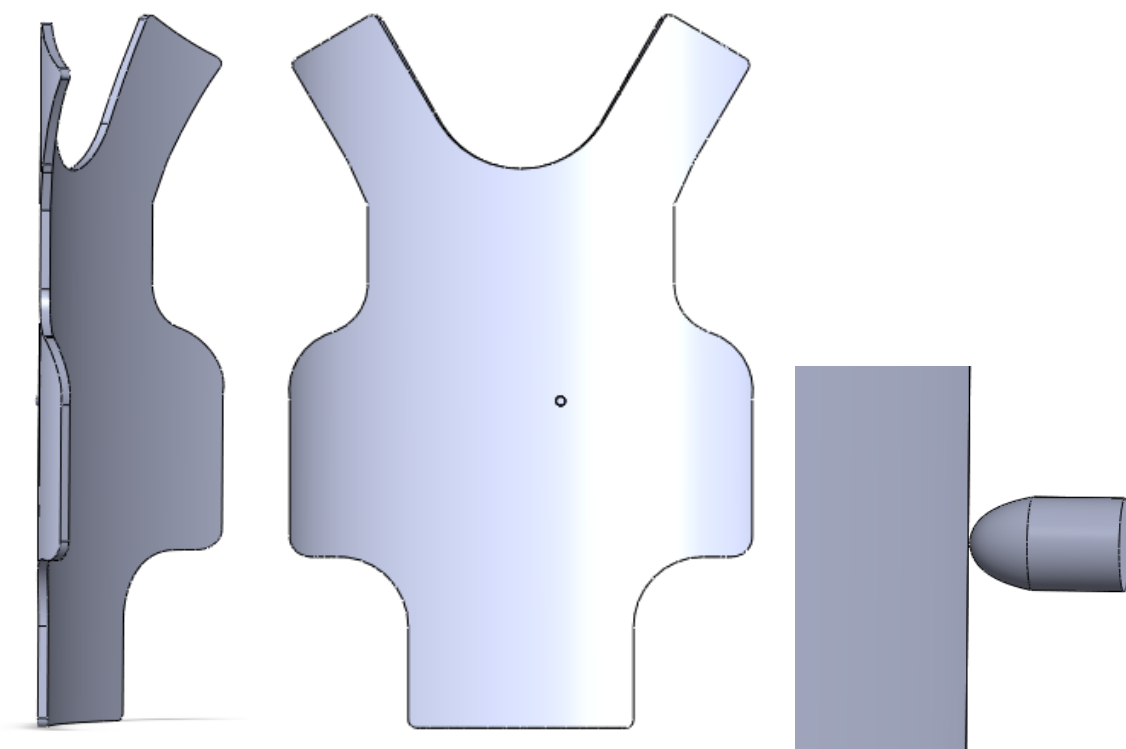
Čím nižší napětí materiál při zkoušce vykazuje, tím má větší odolnost proti vystřelenému projektilu. U deformace platí, že čím menší deformace, tím méně se materiál prohne a nedojde tak k porušení materiálu, popřípadě těla. Proto standardní vojenská vesta obsahuje minimálně 30 vrstev materiálu, aby při zásahu projektilu vysokou rychlostí nepronikl skrz vrstvy a nezpůsobil tak vnitřní zranění. Více vrstev na sebe poskládaných při nárazu projektilu vysokou rychlostí nezpůsobí tak velkou šokovou vlnu, protože je pak materiál dostatečně tuhý a neohebný.

Pro zjištění nejlepší účinnosti neprůstřelných vest bylo provedeno pět zkoušek s rozdílnou orientací vrstev materiálu. Deformace materiálu byla u všech vrstev stanovena jednotně a to na 15 mm. Z dosažených hodnot je zřejmé, že uspořádání vrstev materiálu ve čtvrté zkoušce, kde byly jednotlivé vrstvy orientovány ve směru 45°, 90°, 45°, prokazuje nejnižší napětí, tedy nejvyšší účinnost.

Z tabulky výsledků je zřetelný rozdíl mezi jednotlivými zkouškami. Nejvyšší účinnosti dosahuje orientace materiálu ve čtvrté zkoušce, kde byly jednotlivé vrstvy orientovány ve směru 45°, 90°, 45°. Další zkouškou, která prokázala nízké napětí, je zkouška třetí, kde byly jednotlivé vrstvy orientovány ve směru 90°, 45°, 90°. Dalo by se tedy tvrdit, že orientace materiálu ve směru 45° s kombinací směru 90°, vykazuje nejlepší výsledky. Orientace materiálu ve směru 90°, 90°, 90° v páté zkoušce, má jen nepatrně vyšší hodnotu napětí, než zkouška třetí. Zkoušky první a druhá, kde byly jednotlivé vrstvy orientovány ve směru 0°, 0°, 0° a 90°, 0°, 90°, dosahují nejvyšších hodnot napětí.

Z naměřených výsledků bych tedy doporučila materiál v neprůstřelných vestách orientovat ve směru 45°, 90°, 45°. Tak je tomu u čtvrté zkoušky, kde materiál prokazuje nejnižší napětí při relativně nízké hodnotě deformace.

Cílem dalšího experimentu bude navrhnout model neprůstřelné vesty (obrázek 63), do kterého bude pronikat projektil vysokou rychlostí jako při výstřelu. Model bude pozorován na maximální deformaci, maximální napětí a také zde bude sledováno maximální pohlcení energie (za účelem snížit šokové vlny při nárazu projektilu).



*Obr. 63: Model neprůstřelné vesty*

## **ZÁVĚR**

Neprůstřelné vesty slouží především k ochraně policistů a členů vojenských a zásahových jednotek. Každoročně zachrání stovky lidí na celém světě. Při zasažení nositele lehké vesty zpravidla dochází k vnitřnímu zranění, a to i v případě, kdy je průtisk minimální. Střela se však nedostane do těla, proto je záchranná funkce vest velice pozitivní a nelze pochybovat o jejich důležitosti.

Cílem práce bylo zjistit, zda orientace vláken v neprůstřelných vestách ovlivňuje jejich účinnost. První část práce se proto zabývá materiály používanými pro výrobu balistické ochrany. Další důležitou částí práce je konstrukce neprůstřelné vesty. V experimentální části práce byla zkoumána tahová pevnost vybraného balistického materiálu. Pevnost v tahu je důležitá pro simulaci pevnosti materiálu při průniku projektilu neprůstřelnou vestou. Pro ověření pravosti výpočtu byla provedena simulovaná tahová zkouška. Výsledky odpovídaly reálné tahové zkoušce.

Dynamickou simulací bylo prokázáno, že rozdílná orientace vrstev materiálu má vliv na účinnost neprůstřelné vesty. Simulace střelby byla prováděna pouze na třech vrstvách balistického materiálu, zatímco současné neprůstřelné vesty obsahují minimálně 30 vrstev balistického materiálu. Pro zjištění nejlepší účinnosti neprůstřelných vest bylo provedeno pět zkoušek s rozdílnou orientací vrstev materiálu. Deformace materiálu byla u všech vrstev stanovena jednotně a to na 15 mm. Z dosažených hodnot je zřejmé, že uspořádání vrstev materiálu ve čtvrté zkoušce, kde byly jednotlivé vrstvy orientovány ve směru 45°, 90°, 45°, prokazuje nejnižší napětí.

Téma bakalářské práce je rozsáhlé. Bylo by možné se jím zabývat např. v diplomové práci, která by se mohla zaměřit na jiný balistický materiál nebo praktickou zkoušku střelbou do vytvořeného vzorku vícevrstvé vesty. Praktická zkouška má vysoký potenciál z hlediska prokázání správnosti simulace.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] EHRESTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. 1. vydání. Praha: Scientia, 2009. 351 s.
- [2] DuPont. *Technical Guide Kevlar® Aramid Fiber*. Richmond (VA): DuPont, 2000. 32 s.
- [3] Teijin. *Recycling*. [online]. [cit. 2014-01-12].  
Dostupné z: <http://www.teijinaramid.com/recycling/>
- [4] Teijin. *Recycling. Take-back*. [online]. [cit. 2014-01-12].  
Dostupné z: <http://www.teijinaramid.com/recycling/take-back/>
- [5] Kastilo. *Aramide fibres*. [online]. [cit. 2014-01-12].  
Dostupné z: [http://www.kastilo.com/cgibin/index-lang=en&nav\\_id=310.php.html](http://www.kastilo.com/cgibin/index-lang=en&nav_id=310.php.html)
- [6] Militký, J. *Textilní vlákna: klasická a speciální*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012. 374 s. ISBN 978-80-7372-844-1.
- [7] Teijin. *Aramids. Twaron*. [online]. [cit. 2014-01-12].  
Dostupné z: <http://www.teijinaramid.com/aramids/twaron/>
- [8] Odetka. Produkty. *Specifikace materiálu: Twaron*. [online]. [cit. 2014-01-12].  
Dostupné z: [http://www.odetka.cz/net20/cz/specmat\\_twaron.aspx](http://www.odetka.cz/net20/cz/specmat_twaron.aspx)
- [9] Grm systems. *Aramidové výztuže*. [online]. [cit. 2014-01-12].  
Dostupné z: <http://www.grm-systems.cz/aramidove-vyztuze>
- [10] Neprůstřelné vesty. *Slečna vesta*. 2003. [online]. [cit. 2014-01-12].  
Dostupné z: [http://www.valka.cz/clanek\\_10353.html](http://www.valka.cz/clanek_10353.html)
- [11] Teijin. *Aramids. Technora*. [online]. [cit. 2014-01-12].  
Dostupné z: <http://www.teijinaramid.com/aramids/technora/>
- [12] Knotek, J. Exkluzivní test „neprůstřelných“ vest. *Zbraně & Náboje*. 2007. [online]. [cit. 2014-02-01]. Dostupné z: [http://www.triggerservice.cz/files/default/content/napsali-o-nas/vesty\\_08.pdf](http://www.triggerservice.cz/files/default/content/napsali-o-nas/vesty_08.pdf)
- [13] Fibre Glast. *Kevlar*. [online]. [cit. 2014-02-01]. Dostupné z: [http://www.fibreglast.com/product/Kevlar\\_Plain\\_Weave\\_Fabric\\_2469/Kevlar](http://www.fibreglast.com/product/Kevlar_Plain_Weave_Fabric_2469/Kevlar)
- [14] Composites. *What is Twaron*. [online]. [cit. 2014-02-01].  
Dostupné z: <http://compositeswiki.org/what-is-twaron/>
- [15] CSR incorporated. *Technora® fiber*. [online]. [cit. 2014-02-01].  
Dostupné z: <http://csrbraids.com/index.php/technora-fiber.html>
- [16] DSM Dyneema. *Technical brochure: Dyneema® in marine and industrial applications*. [online]. [cit. 2014-01-15].  
Dostupné z: <http://www.dekkerwatersport.nl/pdf/d12.pdf>
- [17] Dyneema. *About Dyneema®*. [online]. [cit. 2014-01-15].  
Dostupné z: <http://www.dyneema.com/emea/about-dyneema.aspx>
- [18] Odetka. Produkty. *Specifikace materiálu: Dyneema® vlákno*. [online]. [cit. 2014-01-15].  
Dostupné z: [http://www.odetka.cz/net20/cz/specmat\\_dyneema.aspx](http://www.odetka.cz/net20/cz/specmat_dyneema.aspx)

- [19] CSR incorporated. *Spectra<sup>®</sup> fiber*. [online]. [cit. 2014-02-01].  
Dostupné z: <http://csrbraids.com/index.php/spectra-fiber.html>
- [20] Wikipedia. *Zylon*. [online]. [cit. 2014-01-15].  
Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Zylon>
- [21] CSR incorporated. *Zylon<sup>®</sup> fiber*. [online]. [cit. 2014-02-01].  
Dostupné z: <http://csrbraids.com/index.php/zylon-fiber.html>
- [22] Technical F1 dictionary. *Zylon*. [online]. [cit. 2014-02-01].  
Dostupné z: <http://www.formula1-dictionary.net/zylon.html>
- [23] BSST Sicherheitstechnik GmbH. Material Science. 12/2008. [online]. [cit. 2014-02-28].  
Dostupné z: [http://www.bsst.de/content/PDF/050.08120002\\_EN.pdf](http://www.bsst.de/content/PDF/050.08120002_EN.pdf)
- [24] TOMIS, František. Plyetylén. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1961. 261s.
- [25] HUANG, FRINGS, HENNES. *Mechanical properties of Zylon/epoxy composite*. [online]. [cit. 2014-02-28].  
Dostupné z: [http://staff.science.uva.nl/~frings/pub/mech\\_prop\\_Zylon](http://staff.science.uva.nl/~frings/pub/mech_prop_Zylon)
- [26] Teijin. *Twaron – a versatile high-performance fiber*. [online]. [cit. 2014-02-28]. Dostupné z: [http://www.teijinaramid.com/wp-content/uploads/2012/02/1090308\\_Twaron-productbrochurefinal\\_051.pdf](http://www.teijinaramid.com/wp-content/uploads/2012/02/1090308_Twaron-productbrochurefinal_051.pdf)
- [27] Matbase. *Dyneema*. [online]. [cit. 2014-02-28].  
Dostupné z: <http://www.matbase.com/material-categories/natural-and-synthetic-polymers/polymer-fibers/synthetic-fibers/material-properties-of-dyneema.html#properties>
- [28] Honeywell. *Fibers*. [online]. [cit. 2014-02-28]. Dostupné z: <http://www.honeywell-advancedfibersandcomposites.com/products/fibers/>
- [29] Militký, J. *Přednášky: Textilní vlákna, speciální vlákna*. 2. vydání. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. 423 s. ISBN 978-80-7372-169-5.
- [30] POSPÍŠIL, Zdeněk a kol. *Příručka textilního odborníka. Svazek 1*. 1. vydání. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1981. 773s.
- [31] ČSN EN ISO 13934-1. *Tahové vlastnosti plošných textilií - Část 1: Zjišťování maximální síly a tažnosti při maximální síle pomocí metody Strip*. Praha: Český Normalizační Institut, 2013.
- [32] *Elasticita*. [online]. [cit. 2014-03-11]. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/pol/Fyzika%20polymeru/08%20KAPITOLA%206.pdf>
- [33] Body armor news. *How does it work?*. [online]. [cit. 2014-03-11].  
Dostupné z: <http://www.bodyarmornews.com/bullet-proof-vest/>
- [34] Wikipedia. *Počítačová simulace*. [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Po%C4%8D%C3%ADta%C4%8Dov%C3%A1\\_simulace](http://cs.wikipedia.org/wiki/Po%C4%8D%C3%ADta%C4%8Dov%C3%A1_simulace)
- [35] Dynamic Future s.r.o. *Dynamická simulace*. [online]. [cit. 2014-05-08].  
Dostupné z: <http://www.dynamicfuture.cz/produkty/dynamicka-simulace/>



## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Chemická struktura aromatického polyamidu [1]</i> .....	9
<i>Obr. 2: Molekulární struktura aramidového řetězce [23]</i> .....	10
<i>Obr. 3: Výroba aramidových vláken [1]</i> .....	11
<i>Obr. 4: Tkanina kevlaru [13]</i> .....	12
<i>Obr. 5: Kevlarová stříž [13]</i> .....	12
<i>Obr. 6: Chemická struktura kevlaru [7]</i> .....	12
<i>Obr. 7: Formy vlákna twaron [14]</i> .....	15
<i>Obr. 8: Neprůstřelná vesta (spodní vrstva) [14]</i> .....	15
<i>Obr. 9: Chemická struktura twaronu [26]</i> .....	15
<i>Obr. 10: Chemická struktura technory [11]</i> .....	17
<i>Obr. 11: Vláknو technora [11]</i> .....	17
<i>Obr. 12: Molekulární struktura polyetylenového řetězce [2]</i> .....	19
<i>Obr. 13: Schéma vysokotlaké polymerace etylénu [24]</i> .....	20
<i>Obr. 14: Schéma nízkotlaké polymerace etylénu [24]</i> .....	21
<i>Obr. 15: Středotlaká polymerace etylénu [24]</i> .....	22
<i>Obr. 16: Chemická struktura dyneemy [18]</i> .....	23
<i>Obr. 17: Dyneemová vlákna [23]</i> .....	23
<i>Obr. 18: Vláknو dyneemy pod elektronovým mikroskopem [23]</i> .....	23
<i>Obr. 19: Vláknو spectra [28]</i> .....	25
<i>Obr. 20: Chemická struktura zylonu [20]</i> .....	26
<i>Obr. 21: Zylon [22]</i> .....	26
<i>Obr. 22: Zylonové vlákno [25]</i> .....	26
<i>Obr. 23: Materiál pro balistickou ochranu [23]</i> .....	27
<i>Obr. 24: Konstrukce materiálu - tkanina a laminát [23]</i> .....	28
<i>Obr. 25: Vazba plátno [25]</i> .....	28
<i>Obr. 26: Deformace projektilu při zásahu balistického materiálu [33]</i> .....	31
<i>Obr. 27: Optický mikroskop Nikon Eclipse LV100</i> .....	32
<i>Obr. 28: Měření v programu NIS Elements</i> .....	33
<i>Obr. 29: Vzorky materiálu v podélném směru</i> .....	34
<i>Obr. 30: Vzorky materiálu v příčném směru</i> .....	34
<i>Obr. 31: Vzorky materiálu pod úhlem 45°</i> .....	35
<i>Obr. 32: Vzorky materiálu pod úhlem 135°</i> .....	35
<i>Obr. 33: Přístroj LabTest 2.050</i> .....	37
<i>Obr. 34: Software k ovládání zkušebního stroje</i> .....	37
<i>Obr. 35: Vzorek před zkouškou a po zkoušce</i> .....	39
<i>Obr. 36: Vzorek před zkouškou a po zkoušce</i> .....	41
<i>Obr. 37: Vzorek před zkouškou a po zkoušce</i> .....	43
<i>Obr. 38: Vzorek před zkouškou a po zkoušce</i> .....	45
<i>Obr. 39: Napětí ve směru podélném</i> .....	49
<i>Obr. 40: Napětí ve směru příčném</i> .....	50
<i>Vliv orientace vrstev na účinnost balistické ochrany</i>	

Obr. 41: Napětí pod úhlem 45° .....	51
Obr. 42: Zesíťovaný třívrstvý model a projektil 9 mm .....	52
Obr. 43: Maximální napětí se stejnou orientací vrstev .....	53
Obr. 44: Maximální napětí se stejnou orientací vrstev v řezu .....	53
Obr. 45: Maximální deformace ve vrstvách .....	53
Obr. 46: Maximální deformace vrstev v řezu .....	53
Obr. 47: Maximální napětí ve vrstvách .....	54
Obr. 48: Maximální napětí vrstev v řezu .....	54
Obr. 49: Maximální deformace ve vrstvách .....	54
Obr. 50: Maximální deformace vrstev v řezu .....	54
Obr. 51: Maximální napětí ve vrstvách .....	55
Obr. 52: Maximální napětí vrstev v řezu .....	55
Obr. 53: Maximální deformace ve vrstvách .....	55
Obr. 54: Maximální deformace vrstev v řezu .....	55
Obr. 55: Maximální napětí ve vrstvách .....	56
Obr. 56: Maximální napětí vrstev v řezu .....	56
Obr. 57: Maximální deformace ve vrstvách .....	56
Obr. 58: Maximální deformace vrstev v řezu .....	56
Obr. 59: Maximální napětí se stejnou orientací vrstev .....	57
Obr. 60: Maximální napětí se stejnou .....	57
Obr. 61: Maximální deformace ve vrstvách .....	57
Obr. 62: Maximální deformace vrstev v řezu .....	57
Obr. 63: Model neprůstřelné vesty .....	59

## SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Stabilita kevlarového vlákna při vystavení UV záření [2] .....	14
Graf 2: Množství recyklovaného materiálu v tunách za rok [3] .....	18
Graf 3: Porovnání vláken: síla / prodloužení [17] .....	24
Graf 4: Podélný směr - 4. vzorek .....	40
Graf 5: Příčný směr - 1. vzorek .....	42
Graf 6: Směr pod úhlem 45° - 3. vzorek .....	44
Graf 7: Směr pod úhlem 135° - 3. vzorek .....	46
Graf 8: Maximální napětí ve směru podélném .....	49
Graf 9: Maximální napětí ve směru příčném .....	50
Graf 10: Maximální napětí pod úhlem 45° .....	51

## SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Porovnání vybraných vlastností aramidových vláken [5] .....</i>	<i>11</i>
<i>Tabulka 2: Mechanické hodnoty kevlaru [2] .....</i>	<i>13</i>
<i>Tabulka 3: Mechanické hodnoty twaronu [7] .....</i>	<i>16</i>
<i>Tabulka 4: Mechanické hodnoty technory [26] .....</i>	<i>17</i>
<i>Tabulka 5: Mechanické hodnoty dyneemy [27] .....</i>	<i>24</i>
<i>Tabulka 6: Mechanické hodnoty spectry [28] .....</i>	<i>25</i>
<i>Tabulka 7: Mechanické hodnoty zylonu [25] .....</i>	<i>26</i>
<i>Tabulka 8: Hodnoty jednotlivých zkoušek pro podélný směr .....</i>	<i>39</i>
<i>Tabulka 9: Statistika z celkového počtu zkoušek pro podélný směr .....</i>	<i>39</i>
<i>Tabulka 10: Hodnoty jednotlivých zkoušek pro příčný směr .....</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka 11: Statistika z celkového počtu zkoušek pro příčný směr .....</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka 12: Hodnoty jednotlivých zkoušek pro směr v úhlu 45° .....</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 13: Statistika z celkového počtu zkoušek pro směr v úhlu 45° .....</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 14: Hodnoty jednotlivých zkoušek pro směr v úhlu 135° .....</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 15: Statistika z celkového počtu zkoušek pro směr v úhlu 135° .....</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 16: Průměrné hodnoty síly ve všech směrech .....</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 17: Tabulka materiálových hodnot pro ortotropní materiál .....</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 18: Naměřené hodnoty .....</i>	<i>51</i>
<i>Tabulka 19: Naměřené hodnoty .....</i>	<i>58</i>